



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## INFRASTRUKTURA PRO ELEKTRICKÉ AUTOBUSY

INFRASTRUCTURE FOR ELECTRIC BUSES

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matěj Adamec

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

BRNO 2021



# Zadaní bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Matěj Adamec**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Infrastruktura pro elektrické autobusy

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozvoj elektromobily vyžaduje i rozvoj infrastruktury pro nabíjení vozidel. Tato práce bude orientována na problematiku nabíjecích stanic, bateriových úložišť a případně dalších prvků vhodných pro nabíjení elektrobusů zejména pro městskou hromadnou dopravu. Je třeba také provést analýzu, které další prvky vyžadují přechod na masivní využití elektrobusů v MHD.

### Cíle bakalářské práce:

Analýza problematiky možnosti nabíječek a jejich připojení na autobusy. Zpracování přehledu současného stavu poznání v oblasti způsobů nabíjení, komunikace vozidlo nabíječka, standardizace, robotizovaných připojování. Popsat začlenění lokálních bateriových úložišť do nabíjecích stanic. Součástí tématiky by mělo být i zpracování energetické náročnosti vybrané autobusové linky ve městě. Provést diskusi nad získanými poznatky.

### Seznam doporučené literatury:

VARGA, B., CLODEAN, C., FLORIN, M. Electric and Hybrid Buses for Urban Transport: Energy Efficiency Strategies. Switzerland: Springer, 2016. ISBN 978-3-319-41249-8.

BERETTA, J. Automotive electricity: electric drives. 1. Hoboken, NJ: J. Wiley, 2010. ISBN 978--84821-095-0.

JIANG, J., ZHANG, C. Fundamentals and applications of lithium-ion batteries in electric drive vehicles. Singapore: Wiley, 2015. ISBN 978-1-118-41478-1.

LINK, A., O'CONNER, A., SCOTT, T. Battery technology for electric vehicles: public science and private innovation. New York, NY: Swales&Willis, 2015. ISBN 978-1-138-81110-2.

CHAU, K. T. Electric vehicle machines and drives: design, analysis and application. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley, 2015. ISBN 978-1-118-75252-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je zkoumání problematiky nabíjecí infrastruktury elektrických autobusů z pohledu dynamicky nabíjených autobusů, trolejbusů, staticky nabíjených bateriových elektrických autobusů a jejich kombinace ve formě parciálních autobusů. U trolejbusové infrastruktury je popsán způsob napájení trolejové trakce, vlastnosti trolejového drátu a není opomenut provoz parciálních autobusů. Pro nabíjecí infrastrukturu bateriových autobusů je provedeno detailní zhodnocení způsobů připojení k nabíjecí stanici, režimů nabíjení a přehled nabízených řešení nabíjení od vybraných společností. Nemalá pozornost je věnována možnostem standardizace a automatizace připojení k nabíjecím stanicím. V závěrečné kapitole je proveden orientační výpočet optimální kapacity bateriového úložiště pro ujetí vybrané linky a následné zhodnocení řešení nabíjení obsluhujících elektrobusů na této lince.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Elektrický autobus, trolejové vedení, parciální autobus, bateriový autobus, pantograf, nabíjení, nabíjecí stanice

## ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is to examine the charging infrastructure of electric buses from the point of view of dynamically charged buses, trolleybuses, statically charged battery electric buses and their combination in the form of partial buses. In the case of the trolleybus infrastructure, the method of powering the contact wire traction, the properties of the contact wire are described, and the operation of partial buses are not omitted. For the charging infrastructure of battery buses, a detailed evaluation of the methods of connection to the charging station, charging modes and an overview of offered charging solutions from selected companies is performed. Considerable attention is paid to the possibilities of standardization and automation of connections to charging stations. In the final chapter, an approximate calculation of the optimal capacity of the battery storage for the selected line and the subsequent evaluation of the charging solution of the operating electric buses on this line is performed.

## KEYWORDS

Electric bus, overhead contact line, partial bus, battery bus, pantograph, charging, charging stations

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ADAMEC, M. *Infrastruktura pro elektrické autobusy*. Brno, 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 60 s. Vedoucí bakalářské práce Josef Štětina.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením prof. Ing. Josefa Štětiny, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 21. května 2021

.....

Matěj Adamec

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce prof. Ing. Josefu Štětinovi, Ph.D. za poskytnuté materiály, cenné rady, užitečné připomínky a odborné vedení při zpracovávání.

Rovněž bych rád poděkoval rodině a přátelům za nikdy neutuchající podporu.



## OBSAH

Úvod .....	10
1 Historie elektromobility .....	11
1.1 Novodobá historie .....	13
2 Rozdělení elektrických autobusů .....	14
2.1 Trolejbus .....	14
2.2 Bateriový autobus .....	15
3 Trolejbusová infrastruktura .....	17
3.1 Energetické nároky .....	17
3.2 Trolej .....	18
3.3 Provoz parciálního autobusu .....	19
3.4 Smart Trolley Grid .....	20
4 Infrastruktura bateriových autobusů .....	21
4.1 Nabíjecí režimy .....	21
4.2 Připojení k nabíjecí stanici .....	24
4.3 Nabíjecí stanice .....	27
4.4 OCPP .....	33
4.5 Druhý život baterií .....	33
4.6 OppCharge .....	34
5 Zhodnocení energetické náročnosti trasy .....	36
5.1 Výpočet .....	37
5.2 Vhodné řešení nabíjení .....	43
Závěr .....	45
Seznam použitých symbolů .....	54
Seznam použitých zkratk .....	56
Seznam obrázků a grafů .....	58
Seznam tabulek .....	59
Seznam příloh .....	60

## ÚVOD

S narůstajícím zájmem o elektromobilitu v osobní automobilové dopravě bylo jen otázkou času, kdy tento trend zasáhne i ostatní silniční dopravu. Po prvotním úspěchu elektrických pohonů z počátku 20. let byly elektromotory preferovány před motory spalovacími, a to především pro svůj tichý chod. Později začal pokrok stagnovat a spalovací motory naplno dominují trhu. Opětovné pozornosti se jí dostává až s ropnými krizemi v druhé polovině 20. století, které měly za následek nový rozvoj elektromobility, avšak spíše ve formě prototypů elektrických vozidel. Na přelomu tisíciletí již očividná změna klimatu způsobená produkcí skleníkových plynů pocházející z lidské činnosti způsobila posun v mentalitě společnosti, kterou čím dál tím více zajímá stav životního prostředí. Nezanedbatelnou částí, jež se na produkci skleníkových plynů podílí je právě doprava. Díky stále přísnějším emisním normám a dotacím do elektromobility zažívá toto odvětví výraznou renesanci.

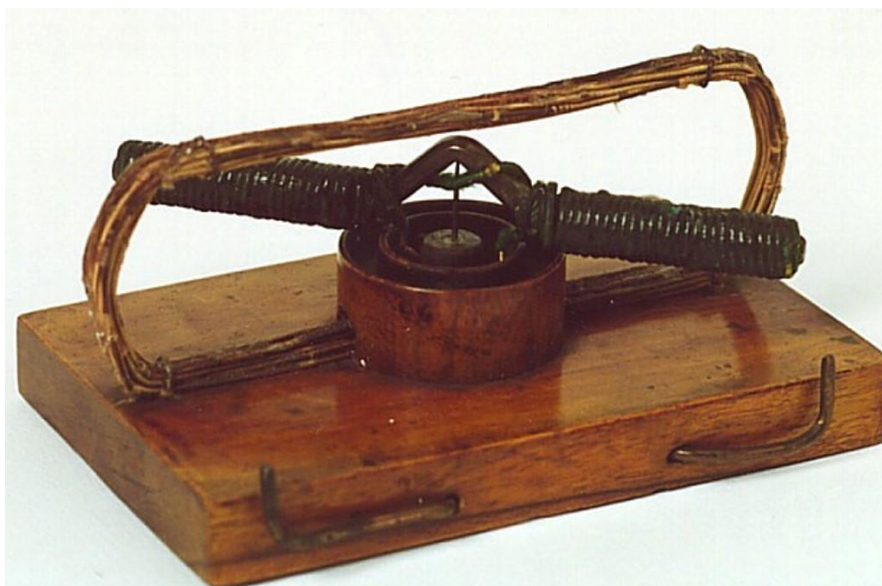
Hlavním účelem sepsání této bakalářské práce je zhodnocení současného stavu poznání v oblasti nabíjecí infrastruktury elektrických autobusů a její konkurenceschopnosti vzhledem ke klasickým autobusům z pohledu výkonu a obslužnosti linek převážně městské autobusové dopravy. V praxi je kromě bateriových elektrických autobusů věnován prostor i trolejbusům, které stále mají široké zastoupení v českých systémech hromadné dopravy a nabízí zajímavý pohled na řešení dynamicky nabíjených elektrických autobusů. Trolejová trakce může posloužit nejen trolejbusům ale i bateriovým autobusům, které ji pomocí pantografu umístěného na střeše mohou využít jakožto nabíjecí infrastrukturu. Kombinací bateriového úložiště a troleje vznikl takzvaný parciální autobus, který umožňuje navýšit operační radius trolejbusu i mimo trolejovou trakci.

Podstatná část práce je věnována problematice bateriových elektrických autobusů, především nabíjení jako takovému z hlediska nabíjecích režimů, kdy jsou zhodnoceny nabíjecí časy a výkony nabíjecích stanic pro každý z režimů. Zhodnocení jsou podrobeny i způsoby připojení k nabíjecím stanicím z pohledu podporovaných nabíjecích režimů. Dále mezinárodní standardy, a v možné automatizaci, která maximálně usnadňuje proces připojení a eliminaci lidského faktoru z celého procesu. Obsahem této sekce je též letmé zhodnocení nabízených řešení nejvýznamnějších výrobců nabíjecí infrastruktury pro světový i lokální trh.

Poslední kapitola práce je věnována zhodnocení energetické náročnosti vybrané linky. Pro elektrobuses EKOVA Electron je vypočten maximální počet absolvovaných jízd na jedno plné nabití baterie a následně provedena diskuze hodnotící způsob nabíjení pro celodenní provoz.

## 1 HISTORIE ELEKTROMOBILITY

Za počátek elektromobility lze považovat objev prvního elektromotoru roku 1827 (obr. 1) Štefanem Aniánem Jedlíkem, slovensko-maďarským knězem, členem Benediktinského řádu. O rok později použil motor obdobné konstrukce k pohonu malého vozíku pohybujícího se po kolejích [1]. Vývoj pokračoval dále. Ve 30. letech se objevují další elektricky poháněné vozy v Nizozemsku a ve Skotsku. Tyto vozy čerpaly potřebnou energii z primárních článků. Jednalo se o články na jedno použití, opětovné nabíjení nebylo možné. V roce 1859 přišel francouzský fyzik Gaston Plane s komerčně vyráběnou olověnou baterií. Dalších dvacet pět let uplynulo než obě tyto technologie, elektromotor a olověné baterie, byly skloubeny v čistě elektricky poháněné vozidlo. Vzniklo vozidlo nevyžadující konstantní připojení k elektrické síti. Za tímto spojením je podepsán anglický vynálezce a průmyslník Thomas Parker [2].



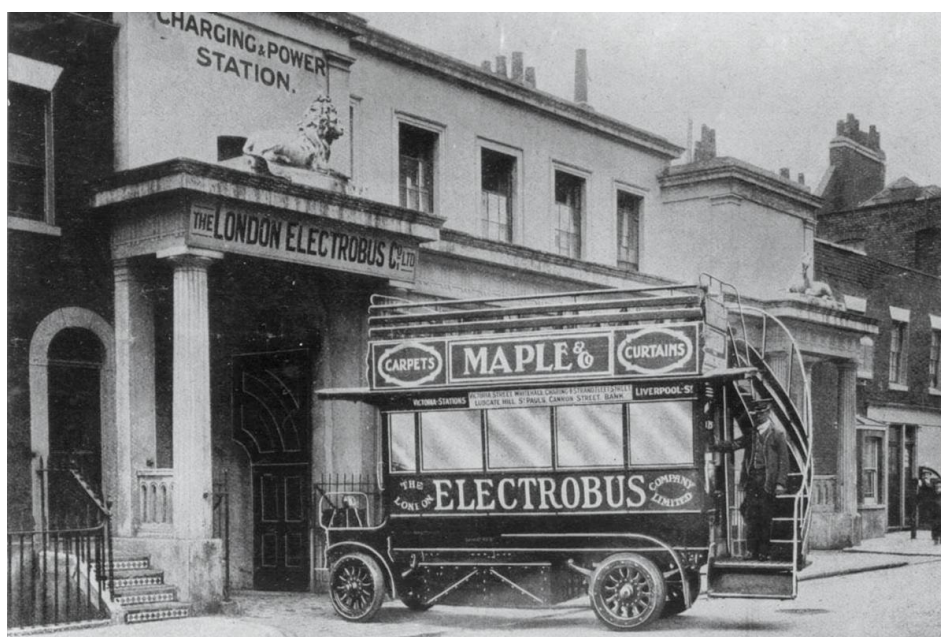
*Obr. 1 Elektromotor Štefana A. Jedlíka [3]*

Roku 1882 doktor Ernest Werner Siemens demonstroval na předměstí Berlína svoji „Elektromote (obr. 2),“ která je považována za předchůdce elektrických autobusů využívajících trakčního vedení. Tento vynález lze tedy označit za první prototyp trolejbusu. Byl to čtyřkolový kočár vybavený dvojicí elektromotorů. Každý elektromotor poháněl jedno ze zadních kol, kam byl kroutící moment převeden pomocí řetězu. Elektrická energie byla přivedena pružným kabelem, který byl na jednom konci připojen ke kontaktnímu vozíku, „Kontaktwagen.“ Tento vozík se pohyboval po nadzemním elektrickém vedení a byl tažen samotnou Elektromote za sebou [4]. Za první hromadné využití elektromobilů určené k přepravě pasažérů lze považovat elektrická taxi operující ve flotile společnosti London Electrical Cab Company od roku 1897. Tato vozidla byla z počátku preferována před benzínovými kvůli vyšší spolehlivosti, ale rovněž díky tiššímu provozu [2].



Obr. 2 Elektromote Dr. Ernsta Wernera von Siemense [4]

V letech 1907 až 1910 začalo londýnskými ulicemi jezdit na dvě desítky elektrických bateriových autobusů (obr. 3). Poháněné byly vyměnitelnými nenabíjitelnými bateriemi s dojezdem dosahujícím 60 kilometrů. Tyto stroje si získaly velkou oblibu u Londýňanů. Avšak kvůli sporům s dodavateli bateriových článků o duševní vlastnictví a špatnému účetnictví, byl tento nadějný projekt předčasně ukončen [5]. Ve spojení s úpadkem klasických elektrických vozů, které přestávaly stačit svým benzinovým protějškům, dochází k poklesu zájmu i u elektrických autobusů. Světlo světa spatřily opět až v padesátých letech dvacátého století, ovšem pouze ve formě prototypů. V 70. letech, za dob ropné krize a razantního růstu cen pohonných hmot, se elektrická vozidla vrací do povědomí. O skutečné revoluci a znovu zavádění elektrických autobusů lze mluvit až s nástupem nového milénia, které se vyznačuje vzrůstajícím zájmem široké veřejnosti o ekologii a udržitelný rozvoj [6].



Obr. 3 Autobus společnosti London Electrobus Company [7]

## 1.1 NOVODOBÁ HISTORIE

Po více jak sedmdesátileté pauze a poklesu zájmu o elektromobilitu jako takovou se objevuje prvotní zájem ze strany dopravních podniků. Z počátku jde výhradně o zájem ze strany velkých amerických center. Snaha je především o snížení množství emisí a znečištění ovzduší v nejhustěji osídlených oblastech. Na počátku 80. let 20. století je možné pozorovat nasazení těchto strojů v Denveru ve státě Colorado, jednalo se o jednotky délky 12,2 metrů s dojezdem okolo 40 kilometrů. V 90. letech v kalifornské Santa Barbaře je nasazeno 8 vozů k pokrytí narůstajícího zájmu o hromadnou dopravu. Maximální dojezd těchto autobusů činil 130 kilometrů, což plnohodnotně stačilo na celodenní provoz. K pohonu sloužily olověné baterie, které byly dobíjeny přes noc. Elektrické autobusy zažívají rozkvět i v Asii, konkrétně v čínském městě Yanzhou. Od roku 2004 operovalo dvanáct malých autobusů s kapacitou 8 osob a olověnými akumulátory, které byly zdrojem elektrické energie. Do roku 2010 byla jednoznačným trendem ve světě elektrických autobusů kompaktnost, rozměry do délky maximálně 10 metrů. Nejběžnějším druhem baterií v tomto období byly olověné akumulátory, v menší míře i nikl-kadmiové [8].

V posledních deseti letech drží Čína bezkonkurenční prvenství při implementaci elektrických autobusů do své hromadné dopravy. V současné době 99 % ze všech elektrických autobusů na světě operuje právě v Číně. Ve městě Shenzhen přispělo nahrazení všech 16000 klasických autobusů elektrickými k výraznému poklesu produkce skleníkových plynů. Odhadováno je až 48 % snížení emisí oxidu uhličitého [9]. Ke konci roku 2018 měla Čína v provozu přes 400 tisíc vozů, Evropa 2250 a Spojené státy pouhých 300. Do roku 2025 je plánovaný nárůst čínského vozového parku elektrických autobusů na 600 tisíc vozů, ve Spojených státech pouhých 5000. Tento přístup je součástí čínského plánu z roku 2009 na snížení potřeby dovozu ropy. Vzhledem k růstu počtu obyvatel rostou i městské aglomerace, s čímž je spojen rozvoj potřebné infrastruktury včetně hromadné dopravy. V kontrastu s čínskou vizí má například New York vizi 100 % bezemisní hromadné autobusové dopravy až pro rok 2040. Londýn se stejnou myšlenkou počítá nejpozději do roku 2037 [10]. Obecně lze tedy říct, že Asie, a především Čína udává světovou dikci elektřinou poháněné městské hromadné dopravy.

## 2 ROZDĚLENÍ ELEKTRICKÝCH AUTOBUSŮ

Elektrobusová doprava je rozdělena do dvou hlavních odvětví, každé s odlišným přístupem k vozidlům využívajícím elektrického proudu jakožto zdroje energie. Jedním ze dvou hlavních směrů jsou dnes již tradiční trolejbusy. Tyto vozy vyžadují nepřetržité připojení k trolejovému vedení, hovoříme zde o tzv. dynamicky nabíjených autobusech. Jsou tedy značně omezeny vlastní infrastrukturou. Druhým směrem ve světě hromadné dopravy, která využívá elektřinu k pohonu jsou elektrické bateriové autobusy. Ty si vozí energii nezbytnou pro svůj provoz s sebou v bateriových úložištích (dále jako BÚ).

Každá z těchto technologií nabízí své klady a zápory převážně plynoucí z podpůrné infrastruktury potřebné pro provoz. Detailnějšímu popisu této problematiky jsou věnovány následující kapitoly. Jisté propojení těchto dvou trendů představují autobusy kombinované (parciální), které využívají tak zvanou Off-wire technologii.

### 2.1 TROLEJBUS

Pro udržení pohonné jednotky elektromotoru v chodu, musí být trolejbus permanentně připojen k elektrické síti. K elektrické rozvodné síti, v tomto případě trakčnímu vedení neboli troleji, je vozidlo připojeno pomocí dvou tyčových sběračů, které jsou na konci osazené klínovými uhlíky. Ty zajišťují přenos elektrické energie do vozu. Sběrač je přitlačován k troleji pružinou, která zajišťuje hladké spojení po celou dobu jízdy. Protože jsou trolejbusy napájené stejnosměrným proudem (DC), je nezbytné spojení pomocí právě dvou sběračů, kdy jeden sběrač slouží jako kladný pól a druhý záporný pól, čím dochází k uzavření elektrického obvodu.

#### 2.1.1 TROLEJBUSOVÉ SYSTÉMY V ČESKÉ REPUBLICE

K dnešnímu dni je na našem území v provozu celkem 14 trolejbusových sítí. Výčtem jsou to tato města s datem roku uvedení dané trolejbusové sítě do provozu: Brno (1949), Ostrava (1952), Plzeň (1941), Hradec Králové (1949), Chomutov – Jirkov (1995), Jihlava (1948) Mariánské Lázně (1952), Opava (1952), Teplice (1952), Ústí nad Labem (1988), Zlín – Otrokovice (1944) a Pardubice (1952) [11]. V těchto městech trolejové systémy fungují bez přerušení provozu dodnes. V Českých Budějovicích, které měly trolejbusovou síť jako jedny z prvních, v provozu od roku 1909 došlo dvakrát k úplnému zrušení a následnému opětovnému nasazení do provozu. Nepřerušeně zde trolejbusy operují od roku 1991 [12]. Hlavní město Praha se k využití trolejbusů vrátilo po 45 letech roku 2018 pilotním úsekem, dlouhým 1,4 kilometru. Ten je rovněž vybaven i nabíjecí stanicí, jelikož je tento úsek obsluhován parciálními autobusy [13].

Největší zastoupení na tuzemské trolejbusové dopravě mají vozy od společnosti Škoda Electric, divize Škoda Transportation v koprodukcí se společnostmi Solaris Bus & Coach a SOR Libchavy [14]. Nejnovějším modelem je Škoda 35TR (obr. 4), který je vyráběn v koprodukcí s Iveco Bus. Iveco má na starosti výrobu karoserií. Představen byl roku 2018. Jedná se o kloubový trolejbus s maximální kapacitou 125 osob. Tento model je možné provozovat jako klasický trolejbus, nebo po rekonfiguraci jako autobus parciální přidáním trakční baterie [15].





*Obr. 4 Model Škoda 35TR [15]*

## 2.2 BATERIOVÝ AUTOBUS

Bateriový elektrobuses je druhem elektrického autobusu, které stoprocentně spoléhá na vlastní zásobu elektrické energie uložené v bateriových úložištích.

Výrobou a vývojem čistě elektrického bateriového autobusu se ve světě zabývá nespočet společností včetně několika českých firem. Největšími světovými výrobci jsou čínská automobilka BYD vyrábějící celé spektrum elektrických vozidel. Proterra, což je nevýznamnější severoamerický výrobce elektrických autobusů a indická společnost Ashok Leyland [16].

Kromě dříve zmíněných trolejbusů Škoda Transportation nabízí i několik čistě elektrických autobusů řady PERUN s modely HP (High Power) (obr. 5) navržený pro rychlé nabíjení a HE (High Energy) pro standardní dobíjení [17, 18]. V portfoliu je i dvojice elektrobusesů s oportunitním dobíjením model E'CITY a 29BB [19].



*Obr. 5 Škoda Perun HP [17]*

Nejmladším českým výrobcem je ostravská společnost EKOVA Electric, dceřiná společnost Ostravského dopravního podniku založená roku 2011. Jejím výrobním modelem je nízkopodlažní EKOVA Electron (obr. 6). Vůz je vyráběn v délkách 12 a 18 metrů [20].



*Obr. 6 EKOVA Electron [20]*



## 3 TROLEJBUSOVÁ INFRASTRUKTURA

Infrastruktura pro provoz trolejbusů je nesmírně komplikovanou a z hlediska investice velice nákladnou záležitostí. Samotný návrh nové trasy ovlivňují desítky faktorů. Zda se jedná o jednotopý, či dvoustopý úsek, způsob zavěšení troleje, ať už na jednostranných výložnicích nebo betonových sloupech. Specifické prvky jako jsou křížení trolejí, výhybky, napájecí body, točny, či samotné měnírny spadají do odlišné kategorie při řešení výstavby. Jedním z nejvýznamnějších dodavatelů trolejových armatur, izolačních prvků, ale i sběracích tyčí a hlavic pro český trh a část Evropy, je firma ESKO Praha.

### 3.1 ENERGETICKÉ NÁROKY

Trakční trolejové vedení na území České republiky je napájeno stejnosměrně 600 V, respektive 750 V. Napětí 600 V DC je standardem u systémů vystavěných do 90. let minulého století. Disponuje jím tedy většina velkých krajských měst. Napětí napájecí soustavy 750 V je možné nalézt například v Českých Budějovicích, či Chomutově [22]. Vozy Škoda Electric, největšího dodavatele pro většinu těchto systémů, jsou navrženy pro provoz na obou těchto standardech.

#### 3.1.1 PARDUBICKÁ TROLEJOVÁ TRAŤ

Jelikož je v současnosti na našem území v provozu 14 trolejbusových systémů a každý se zcela rozličnými parametry, tj. délkou trolejové trati, napájecí soustavou a mnoha dalšími, byl pro popis základních charakteristik trolejbusové infrastruktury v České republice vybrán systém města Pardubic. Dopravní podnik města Pardubic má dlouholetou zkušenost s provozem těchto vozů. S celkovou délkou trolejové tratě 33 kilometry a plány na budoucí rozšíření (i s využitím parciálních autobusů), je ideální volbou pro popis základních prvků dané infrastruktury.

Napájení celé soustavy zajišťuje celkem 5 měníren pro převod vysokého napětí rozvodné sítě v režimu 35/0,66 kV, případně 6/0,66 kV. Měnírny mají nainstalovány sekundární proudový výkon trafousměrňovačů, a to v následujících konfiguracích: 2 měnírny s výkonem 1500 A, a následně po jedné 3000 A, 4500 A a 6000 A. Připravené k výstavbě jsou další 2 měnírny se sekundárním výkonem 1500 A. Napájecí kabely, které zajišťují přenos elektrické energie jsou jednožilové a jsou vyrobené z hliníku o průřezu 500 mm<sup>2</sup>. Na trati je celkem 30 napájecích bodů a další 4 jsou plánovány k výstavbě. Rovněž je součástí trolejové sítě dvojice přibližovačů zkratu, nacházející se před točnou v okrajové části města Černá za Bory a na trase do Lázní Bohdaneč [23].

#### 3.1.2 PŘÍBLIŽOVAČ ZKRATU

Raritou českých trolejových systémů je tzv. přibližovač zkratu (obr. 7), vynález mostecké společnosti DYSK. Jedná se o zařízení osazené silovým tyristorem a měřením proudu. Při překročení stanovené meze hodnoty proudu v koncovém úseku trati dojde k otevření tyristoru, který je za stávajícího provozu uzavřen a vyzkratuje vedení blíže k měnírně. Měnírna toto vedení vypne a tyristor je opětovně uzavřen. Dojde k proměření daného úseku a pokud zkrat odezněl, je vedení nazpět připojeno [24]. Tento systém je zcela automatický, nevyžaduje

zásah člověka. Přináší jednoduché a ekonomicky nepříliš nákladné řešení problematiky koncových úseků trolejové trati příliš vzdálených od napájecích bodů, kde nebylo z jiných důvodů možné měničnu zbudovat. Do budoucna je plánováno nahrazení těchto zařízení dotačními bateriovými úložišti, která by zároveň vyrovnávala úbytek napětí v těchto úsecích.

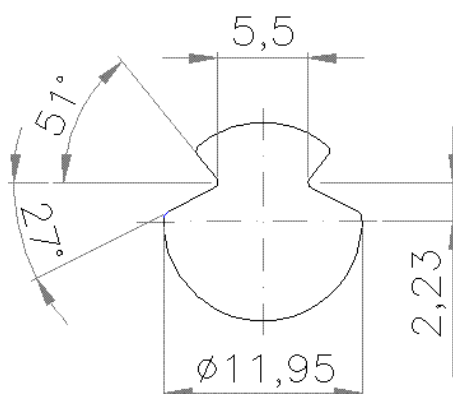


Obr. 7 Náhled do skříně přibližovače zkratu [24]

### 3.2 TROLEJ

Charakterizujícím prvkem trolejového vedení je samotný trolejový drát, který umožňuje zásobování trolejbusu elektrickou energií. Z tohoto důvodu je vyráběn nejčastěji z elektrolytické mědi s možností legování stříbrem, cínem, kadmiem, případně hořčíkem [25]. Tyto legující prvky se podílí na zvýšení důležitých mechanických i fyzikálních vlastností jako je vodivost, pevnost a tepelná odolnost. Maximální přípustné opotřebení drátu je stanoveno na 40 % [26].

Používaný průřez je výhradně kruhový se dvěma podélnými drážkami (obr. 8). Hlavní úlohou těchto drážek je pevné uchycení drátu, tak aby nezasahovalo do dráhy hlavice sběrače. Na území ČR se využívá drát průřezů 80, 100, 120 a 150 mm<sup>2</sup>. Specifický průřez je určen vždy pro konkrétní použití po zhodnocení, pro jakou konkrétní dráhu má být použit, pro jakou proudovou soustavu je určen, případně pro jaký úsek daného systému trati je určen. V Pardubicích je nejvíce zastoupen drát s průřezem 100 mm<sup>2</sup> [23]. Nejedná se ovšem o evropský natož světový standard. Například ve Francii je používán spíše oválný průřez, který je neslučitelný s naším převážně kruhovým průřezem [24].



Obr. 8 Průřez trolejového drátu 100 mm<sup>2</sup> [27]

### 3.3 PROVOZ PARCIÁLNÍHO AUTOBUSU

Pro města s rozvinutou sítí trolejového vedení může být výhodnou alternativou k samotnému rozšíření stávajícího zatrolejování, jež samo o sobě je dosti ekonomicky nákladné, možnost nasazení parciálních trolejbusů do provozu. Technologie jízdy využitá u těchto vozidel je označována jako Off-wire, kdy trolejbus automaticky odpojí tyčové sběrače na konci trolejové trati a pokračuje dál v jízdě na baterii. Jako ideální provozní poměr se udává 2:1, tedy dvě třetiny jízdy jede trolejbus v klasickém režimu se zvednutými sběrači. Třetí třetinu jízdy využívá k pohonu elektromotorů vlastní energii, naakumulovanou po čas připojení k troleji. Současný vývoj směřuje k snížení tohoto poměru na 1:1, čehož může být docíleno například zvýšením proudu protékajícího trolejí.

Na obr. 9 jsou zachyceny takzvané natrolejovací stříšky. Jejich účel je zjevný, slouží k přesnému navedení hlavic poloautomatických sběracích tyčí zpět na trolej a k opětovnému připojení trolejbusu k elektrické síti. K přesnějšímu navedení jsou tyto segmenty doplněny o vodorovnou vizualizaci, která řidiči říká, kam až je třeba s vozem dojet. V této konfiguraci celý proces znovupřipojení zvládne jediný člověk, a to bez potřeby opustit kabinu trolejbusu. Pro celkovou odolnost a proti opotřebení při zavádění sběrače i všem venkovním vlivům jsou tyto stříšky vyrobeny z polykarbonátu.



*Obr. 9 Natrolejovací stříšky*

### 3.4 SMART TROLLEY GRID

Smart Trolley Grid je logickým vývojem Off-wire technologie a parciálních trolejbusů. V trolejbusu druhé generace je pro potřeby jízd bez sběračů instalováno již jednou použité bateriové úložiště, které by jinak již nenašla uplatnění. Další novinkou tohoto systému je možnost rekuperace při brzdění, někdy označovaná jako IMC (In Motion Charging) a nabíjení během jízdy [28]. Pokud je baterie dobytá na 100 % své kapacity, je tato přebytečná získaná energie distribuována zpátky do troléjí a následně do rozvodné sítě. Rekuperace zároveň umožňuje zvýšení možného dojezdu při režimu jízdy Off-wire, na baterii.

Rekuperovaná energie má i další možnost využití. Trolejové sloupky této sítě je možné vybavit použitými bateriemi z elektromobilů k jejichž nabíjení poslouží rekuperací získaná elektrická energie, případně nabíjení z malého solárního panelu umístěného na onom sloupu. Bateriové úložiště je vybaveno indikací stavu nabití a elektrickou zásuvkou umožňující nabíjení elektromobilu [29].

Zainteresované subjekty pochází jak z Německa, tak Nizozemí. Přímo na projektu se podílí spolková země Severní Porýní-Vestfálsko, nizozemská provincie Gelderland a ze soukromého sektoru společnost Bordbusters a podnik Fransen Technical Services, sídlící v Arnhemu. Právě nizozemský Arnhem se stal testovacím prostorem, kde bude nové pojetí trolejbusové dopravy 21. století vyzkoušeno v praxi [30]. Ve městě operuje 43 trolejbusů na šesti linkách s celkovou délkou 60 kilometrů trolejové trati [29]. STG je součástí širší spolupráce dalších čtyř evropských zemí pod projektem nesoucím název Trolley:2.0 [31].

## 4 INFRASTRUKTURA BATERIOVÝCH AUTOBUSŮ

Největší překážkou k plnohodnotnému užívání elektrické energie jakožto hlavního zdroje energie k pohonu vozidel, je nízká energetická hustota bateriových článků. Nejvyššího potenciálu přímé konkurence pro benzín nabízí Li-air články s hodnotou  $1700 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$  [32]. V tabulce 1 je shrnuta maximální hodnota pro ostatní baterie s významným zastoupením na trhu:

Tab. 1 *Přehled energetické hustoty různých článků [33, 34, 35]*

Typ článku	Maximální energetická hustota [ $\text{Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]
Li-ion	120
Ni-Cd	80
Ni-MH	120
LiFePO <sub>4</sub>	160
LTO	110

Z tohoto důvodu je dojezd autobusů nejvíce limitován rozměry a hmotností úložišť. Jelikož elektrickou energii nelze tak snadno „natankovat“, bylo k řešení této problematiky přístupováno dvěma způsoby. První byla limitace velikosti bateriového úložiště, kdy bylo zapotřebí častějšího dobíjení, což nevyhnutelně znamenalo kratší ujetou vzdálenost na jedno nabití. Druhým přístupem byla rozměrná bateriová úložiště, která mnohdy zasahovala svými rozměry do prostor pro cestující, a tím snižovala maximální možnou obsazenost autobusu. S příchodem vysokovýkonných nabíjecích stanic ovšem neduh časové náročnosti nabíjení odpadá a pro městské autobusy již není nadále zapotřebí rozměrných BÚ.

### 4.1 NABÍJECÍ REŽIMY

Provoz linek městské hromadné je dlouhodobě plánovaný. Jsou přesně definované, tudíž je pro ně na rozdíl od elektromobilů snadná implementace nabíjecí infrastruktury přímo do trasy obsluhované linky. Logickým a z hlediska provozu vhodným řešením umístění nabíjecích stanic jsou kromě depa například konečné zastávky a točny. Zde je pro svou možnost odstavení elektrobuse na dobu nezbytně nutnou k nabití baterie. Široké spektrum nabíjecích stanic umožňuje dopravním podnikům přijít s co nejvhodnějším řešením nabíjení na kterékoliv městské lince s přihlédnutím k těmto faktorům:

- Počet zastávek na lince – rozjezd autobusu po úplném zastavení je energeticky náročný
- Obsazenost autobusu – hmotnostní rozdíl mezi plně naloženým a prázdným autobusem se přímo promítá do celkové spotřeby energie
- Délka trasy – kolik jízd je elektrobuse schopen ujet na jedno nabití
- Výškový profil – členitý terén bude vyžadovat větší množství energie než rovinná krajina
- Plynulost jízdy – zastavení na křižovatkách, semaforech

Právě baterie tvoří značnou část hmotnosti vozidla, a tedy přispívá k vyšším energetickým požadavkům. Kompenzací minimalizace úložišť je vyšší četnost nabíjení, navýšení nabíjecího výkonu stanic a s ním spojené zkrácení délky nabíjecích cyklů. Pomalé nabíjení však úplně nevymizelo. Běžně je využíváno při odstavení autobusu v depu. Pomalým nabíjecím cyklem jsou nabíjeny i elektrobusy s kapacitou úložiště v rámci stovek kWh, jejichž denní dojezd na jedno nabití dosahuje stovek kilometrů.

#### 4.1.1 POMALÉ NABÍJENÍ

Uplatňováno je převážně v noci, během nočního stání elektrobusu v depu, i proto je někdy označováno jako noční nabíjení. Během noci dochází k dobití baterií na 100 % své kapacity a zároveň k vybalancování jednotlivých článků bateriového úložiště na stejnou hodnotu napětí. O to se stará Battery Management System, zkráceně BMS. BMS chrání baterii před hlubokým vybitím, přebitím a přehříváním článků. U aktivně chlazených baterií hlídá také tok chladicí tekutiny (vzduch, voda). Díky tomu je možné prodloužit životnost baterie až na pětinasobek, oproti bateriím bez BMS [36]. Tento vyrovnávací cyklus je využívám u většiny elektrických autobusů a je výrobcí přímo doporučováno, aby BÚ bylo alespoň jednou denně tímto způsobem plně dobíto.

Délka nabíjecího cyklu pomalého nabíjení se pohybuje v řádech hodin. Obecně lze říct, že nabíjecí výkon stanice pro tento způsob nepřesahuje hodnotu 150 kW. Příkladem může být zásuvkové noční dobíjení s vyvažováním u vozu Škoda Perun HE i HP nabíjecím výkonem 50 kW, pro které výrobce udává čas 6-8 hodin [17, 18].

Problematika délky nabíjecích cyklů neumožňuje využití pomalého nabíjení do klasického městského provozu během dne. U dálkových autobusů, které disponují větším prostorem pro uložení rozměrné baterie a které mají nižší četnost denního provozu, je naopak dostačujícím.

#### 4.1.2 RYCHLÉ NABÍJENÍ

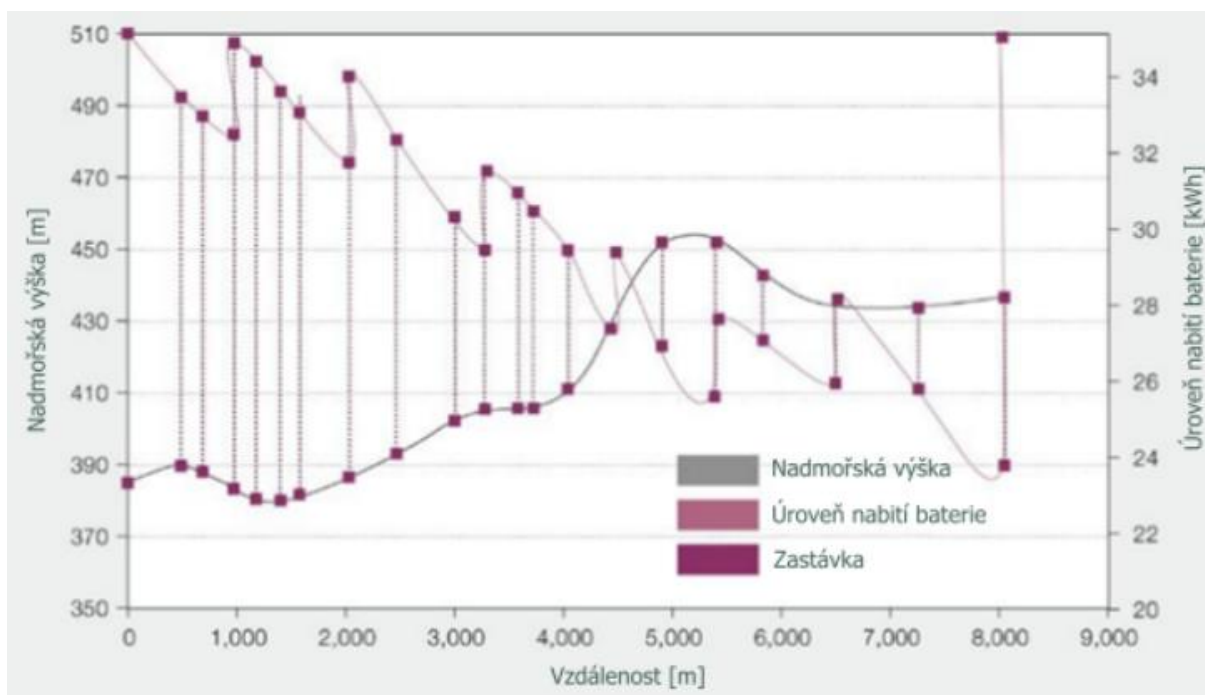
Rychlé nabíjení je využíváno tam, kde současná technologie úložišť elektrické energie neumožňuje na frekventovanějších linkách celodenního provozu jen jedno nabití, ale je potřeba akumulátor dobít i několikrát denně.

Délka samotných nabíjecích cyklů se pohybuje v jednotkách i desítkách minut, nikoliv v hodinách, jak tomu bylo u předchozího režimu. Tohoto razantního zkrácení nabíjecí doby je dosaženo navýšením nabíjecího výkonu NS, a to až na 600 kW. Možnost nasazení na běžných městských linkách je díky těmto faktorům preferována. Nabíjecí stanice (dále jako NS) je nejčastěji umístěna na točně nebo konečné stanici, kde je možnost odstavit elektrobus po dobu nezbytně nutnou pro absolvování nabíjecího cyklu. Dobu nezbytně nutnou pro nabíjení je pak možné vložit do čekací přestávky mezi jednotlivými jízdami.

### 4.1.3 TOSA

Projekt TOSA (název je složen ze čtyř subjektů, které se na projektu podílejí) ve švýcarské Ženevě a Davosu je příkladem smíšeného nabíjecího cyklu s využitím ultrarychlého zastávkového dobíjení. Pilotní úsek kombinovaně dobíjené linky byl představen roku 2013 a od té doby je postupně rozšiřován. Elektrobusy v systému TOSA jsou vybaveny nezvykle malou, z hlediska kapacity baterií, pouhých 40 kWh. Zmenšení a odlehčení BÚ umožnilo jeho umístění na střechu. Aby byl dosažen potřebný dojezd elektrobusu, je uplatněno tzv. zastávkové nabíjení. Každá třetí až čtvrtá zastávka je vybavena NS doplněnou o superkapacitor [37]. Superkapacitor je v průběhu dne pomalu dobíjen nízkým výkonem. Slouží tedy jako vyrovnávací prvek mezi sítí a nabíjecí stanicí, což by při ultrarychlém nabíjení významně zatěžovalo rozvodnou síť [38]. Vývoj úrovně nabití BÚ v průběhu jízdy je znázorněn na diagramu (obr. 10). Baterie autobusu je dobíjena třemi zcela rozdílnými nabíjecími cykly:

- Flash-charging Station (FCS) – Ultra rychlé dobíjení baterie během stání na zastávce, přibližně 15 až 20 sekund. Nabíjecí výkon činí 600 kW.
- Terminus Feeding Station (TFS) - Nabíjení na konečných zastávkách výkonem 200 kW po dobu 4 až 5 minut.
- Depot Feeding Station (DFS) - Nabíjení v depu v časovém intervalu 45 minut výkonem 50 kW přímo ze sítě.



Obr. 10 Diagram úrovně nabití baterie během jízdy [39]

Proces zastávkového nabíjení probíhá po dobu stání v zastávce, při výstupu a nástupu cestujících přibližně po dobu 15 až 20 sekund. K připojení autobusu k FCS a TFS slouží robotické rameno naváděné pomocí laseru do vodivé stříšky na NS. Tento proces připojení je zcela automatický a trvá necelou sekundu [40]. Cílem toho projektu bylo ukázat, že průběžně dobíjený elektrobus může plnohodnotně konkurovat klasickým autobusům v četnosti spojů i přepravní kapacitě.



## 4.2 PŘIPOJENÍ K NABÍJECÍ STANICI

Na rozdíl od nabíjecích stanic pro elektromobily, které využívají výhradně kabelové připojení, nabízí elektrické autobusy rozmanitější spektrum způsobů připojování. S příchodem rychlého nabíjení, které je umožněno vysokým výkonem nabíjecích stanic, se původní způsob připojení pomocí kabelu dostává spíše do pozadí. To však neznamená, že by se na něj úplně zapomnělo. Kabelové spojení je důležité především pro noční nabíjení a stabilizování článků. Zásuvkou pro konektory CCS je stále vybavena většina autobusů jakožto alternativní způsob připojení k automatizovaným připojovacím pantografům a kolíkům.

Nemalá část podkapitoly je věnována indukčnímu nabíjení vozidel. Ač se jedná o nepříliš rozšířený způsob skýtající nemalé výhody, měly by být při návrhu elektrických linek zohledněny.

### 4.2.1 KABEL

V zahraniční literatuře označováno jako Plug-in nabíjení. Zásuvkou pro připojení konektoru kabelu je vybavena značná část elektrických autobusů. Nejčastěji jsou kabelové nabíjecí stanice umístěny v depu, kde slouží k nočnímu pomalému nabíjení a stabilizování článků. Je možné je využít rovněž pro rychlé nabíjení a často je tohoto připojení využíváno pro sekvenční nabíjení.

CCS (Combined Charging System), v překladu systém kombinovaného nabíjení je jednotný standard pro nabíjení elektrických vozidel včetně elektrobuses. Tento standard využívá konektorů Combo 1 (obr. 11), někdy označované jako CCS1, a Combo 2 (obr. 12) alternativně označované jako CCS2. U nabíjecích zásuvek CCS dochází ke kombinaci vstupů stejnosměrného i střídavého proudu. Dochází u nich ke sdílení nabíjecích kolíků. Díky sdílenému designu DC kolíků (spodní část konektorů) je pro výrobce nabíjecích stanic snadná zaměnitelnost mezi CCS1 a CCS2 [41]. Design nabíjecího konektoru vychází z původních konektorů IEC 62196 Type 1 a Type 2, kde došlo o jejich rozšíření dvěma DC kolíky. Díky tomuto rozšíření je umožněno vysokovýkonné rychlé nabíjení stejnosměrným proudem až 350 kW [42]. Hlavním trhem pro Combo 1 je Severní Amerika a rovněž je užíván v Jižní Koreji. Pro Combo 2 je primárním trhem Evropa. Používá se i v Austrálii, Jižní Americe, JAR, nebo na Arabském poloostrově v Saudské Arábii [43].



*Obr. 11 Konektor CCS Combo 1 [44]*





Obr. 12 Konektor CCS Combo 2 [44]

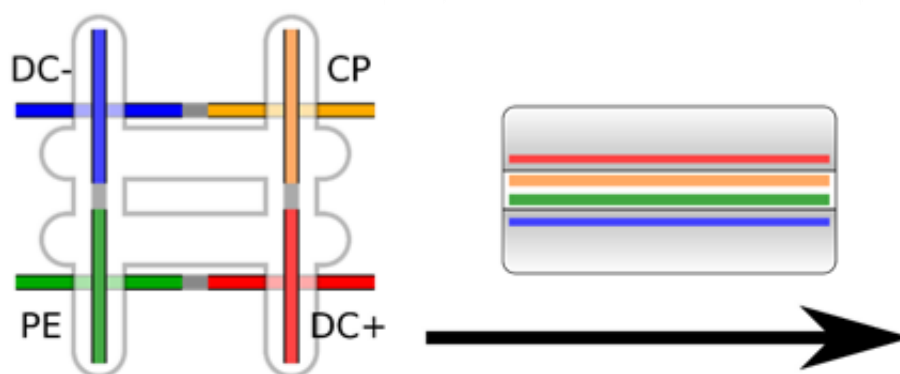
Výrobce elektrických autobusů Ebusco ve spolupráci s dodavatelem automatizovaných připojovacích zařízení pracují na automatizaci autobusových dep pomocí robotizace. Jejich nabíjecí robot je schopen automaticky a s absolutní přesností zapojit nabíjecí konektor CCS do zásuvky autobusu bez účasti člověka [45]. Tento způsob by měl plně eliminovat lidský faktor při kabelovém nabíjení. Šetří čas a zároveň řeší možnost nesprávného zapojení konektoru do zdířky elektrobuse, jehož následkem by byla prázdná baterie.

#### 4.2.2 PANTOGRAF

Připojení k NS pomocí pantografu je v současné době nejrozšířenějším způsobem připojení elektrického autobusu pro rychlé nabíjení. Tato koncepce umožňuje různorodost připojovacího rozhraní. Stykové plochy je možné osadit dvoupólovým, třípólovým, nejčastěji čtyřpólovým, ale dokonce i pětípólovým kontaktním rozhraním. Celý systém je rozdělen do dvou, respektive tří způsobů využití tohoto spojení. Prvním a zřejmě i nejhojnějším způsobem realizace je umístění připojovacího pantografu na nabíjecí stanici. Odlišným pojetím je umístění pantografu přímo na střechu vozidla. Tento způsob lze rozdělit do dvou podvariant. Jedna využívá dedikovaných nabíjecích bodů nejčastěji umístěných v depu, nebo na konečných zastávkách. Druhá pod varianta čerpá potřebnou energii z trolejového vedení, ale nejedná se o dynamické dobíjení jako u trolejbusu, nýbrž o stacionární.

Pantograf umístěný na NS je součástí standardu OppCharge, který bude ještě detailněji popsán dále v této kapitole. Protože je pantograf součástí stanice, dochází k výraznému odlehčení autobusu. Připojení k nabíjecí stanici prostřednictvím pantografu na střeše je velice rychlé a přesné. Slouží jak pro noční nabíjení celé flotily, tak pro ultra rychlé nabíjení během linkového provozu.

Dva výše zmíněné druhy připojení popisuje standard SAE J-3105. Jedná se o doporučený postup pro automatizovaná připojovací zařízení elektrických autobusů a obecně těžkých vozidel s BÚ. Přímě definuje architekturu tohoto spojení mezi vozidlem a nabíječkou, aby byla zaručena interoperabilita mezi jednotlivými výrobci, kteří tento standard podporují. Dělí se do tří doplňkových standardů pro konkrétní automatizovaná připojení. J-3105-1 upravuje příčné kolejnicové spojení, J-3105-2 připojení pantografu na vozidle. Dále je definováno vodivé uzavřené spojení kolíku se zásuvkou, které upravuje oddíl J-3105-3 [46]. Zde se již nejedná o pantografové spojení. Na obr. 13 jsou znázorněny čtyři póly definované pro první dva oddíly.



Obr. 13 Rozložení pólů pro J-3105-1 a J-3105-2 [47]

*DC- = záporný pól, DC+ = kladný pól, PE = Zemní vodič, CP = kontrolní vodič  
Šipka znázorňuje orientaci vozidla pod nabíjecí stříškou*

Odlišnou strategii využití pantografu k nabíjení v tomto případě dobíjení trakční baterie můžeme pozorovat například u vozů Škoda Transportation modelů E'CITY a 29BB (obr. 14). Zde hovoříme o takzvaném oportunním dobíjení (opportunity recharging), kdy úlohu nabíjecí stanice zastupuje stávající trolejová infrastruktura, ke které se vozidlo připojí pomocí vlastního pantografu umístěného na střeše [19]. Připojení je zcela automatizováno a probíhá nejčastěji na točnách. S obdobným konceptem přišel i italský výrobce autobusů Rampini s dobíjecí technologií Siemens, které jezdí například ve Vídni [48].

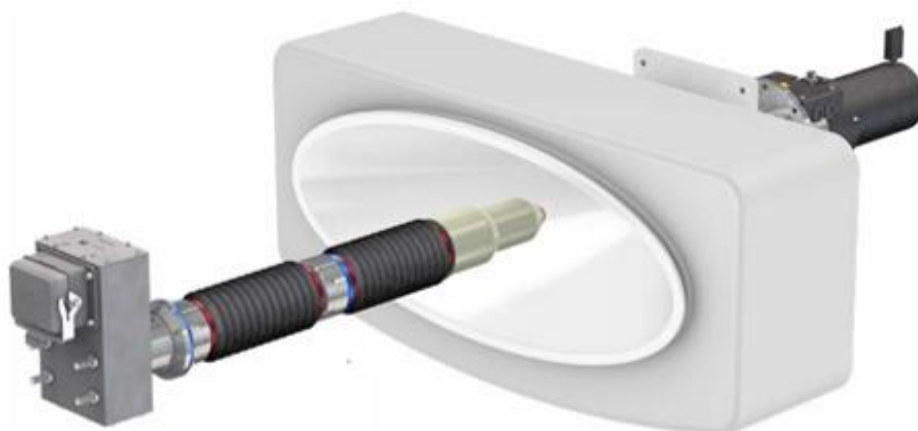


Obr. 14 Škoda BB29 se zvednutým pantografem [49]

#### 4.2.3 QCC

QCC je zkratkou pro Quick Charging Connector. Společnost Stäubli využívá uzavřeného spojení kolíku a zásuvky (obr. 15), které podléhá standardu SAE J-3105-3. Jedná se o alternativní způsob rychlého dobíjení nejen elektrických autobusů, ale i například nákladních aut a lodí. Jde o vhodné řešení pro zastávkové nabíjení i pro rychlé nabíjení na konečných. Zásuvka autobusu je osazena kónickým ústím, díky kterému dojde k přesnému navedení kolíku. Spojovací kolík je dokonale vodotěsný a bezpečný na dotek [50]. Díky malým

rozměrům a kompaktnímu designu je možné zakomponovat konektor nabíječky přímo do konstrukce zastávky, aby opticky nenarušoval její okolní prostředí tak, jako je tomu například u stanic OppCharge.



*Obr. 15 Detail uzavřeného spojení kolíku a zásuvky [50]*

#### 4.2.4 INDUKČNÍ NABÍJENÍ

Bezdrátové indukční nabíjení lze rozdělit do dvou podskupin. Na statické s fixním nabíjecím stáním a dynamické, kdy je obdobně jako u trolejbusu energie dodávána průběžně během jízdy. Tento způsob, ač možný je velice nákladný na realizaci, provoz a údržbu. Primárně je z tohoto důvodu preferována varianta první, tedy využití statického nabíjení na vybraných nabíjecích stáních.

Indukční nabíjení probíhá jako elektromagnetická rezonance mezi dvěma cívkami, jednou na palubě vozidla, v jeho spodní části, druhou zabudovanou ve vozovce. Autobusy, jakožto vozidla s fixní trasou jsou pro tento způsob nabíjení nejvhodnější. Vysoká četnost nabíjecích bodů umožňuje zmenšení velikosti vlastního bateriového úložiště ve voze. To se promítne i do celkového snížení hmotnosti elektrobuse [51].

Benefity spojené se snížením velikosti baterie a odlehčením vozidel jsou částečně negovány počátečními investicemi do správy a výstavby nabíjecí infrastruktury a jejího následného udržování. V dlouhodobém horizontu se ovšem toto řešení jeví ekonomicky výhodnější. Oproti klasickým kabelovým nabíjecím stanicím, které musí být umístěny pro co nejmenší zásah do provozu na konečných stanicích a v depu, je výhodou indukčních nabíjecích stanic jejich možná integrace přímo do vozovky [52]. Proto obdobně jako QCC je vhodným řešením do center, kde stožár rychlonabíjecí stanice vizuálně hyzdí okolí.

### 4.3 NABÍJECÍ STANICE

Pro potřeby nabíjení elektrických autobusů je napájení z rozvodné sítě naprosto nedostačující, kdy maximální výkon dosahuje nejvýše 22 kW s připojeným Wallboxem, což by stěží stačilo na noční dobíjení baterií.

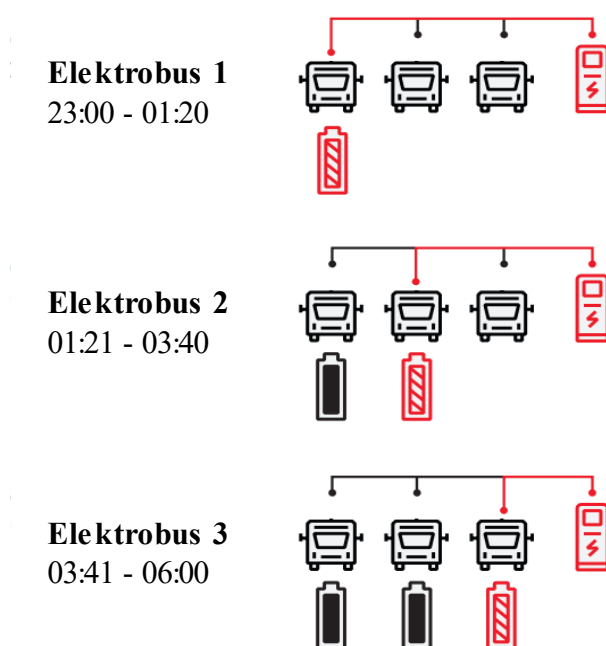
Nejpodstatnějším rozdílem mezi elektrickým autobusem a elektromobilem je absence palubní nabíječky, jež konvertuje střídavý proud ze sítě na stejnosměrný, který je určen k napájení článků baterie. Konverze probíhá v nabíjecích centrech a systémech mimo nabíjecí stanice, které pouze umožňuje přenos mezi stanicí a elektrobusem.

V této kapitole je shrnut přehled nejvýznamnějších společností pro náš i zahraniční trh s nabíjecí infrastrukturou pro elektrické autobusy.

#### 4.3.1 ABB

Společnost ABB je světovým leaderem v oblasti energetiky, automatizace, robotiky a mnoha dalších odvětvích. V segmentu elektromobility nabízí komplexní řešení nabíjecí infrastruktury pro elektromobily, těžkotonážní vozidla, elektrické nákladní vozy a elektrobusy. Je schopná dodat koncovému zákazníkovi veškeré potřebné komponenty pro provoz elektrických autobusů. Nabíjecí stanice, distribuční centra elektrické energie, či bateriová úložiště pro nabíjecí stanice. Mohou dodávat buď jednotlivé produkty, nebo produkt jako jeden funkční celek v prefabrikované podobě. Pro kontrolu, správu a údržbu dodaného řešení slouží software ABB Ability™. Cílem ABB je v sektoru infrastruktury elektrických autobusů poskytnout flexibilní řešení širokou nabídkou nabíjecích stanic včetně rozdílných druhů připojení, a zároveň umožnit připojení co největšího počtu elektrobusů využitím mezinárodních nabíjecích standardů. V nabídce společností jsou k nalezení tři druhy nabíjení. Kabelové stanice a dvě pantografové buď s připojením zespod (pantograf na vozidle) nebo z vrchu (pantograf na NS).

Kabelové nabíjecí stanice ABB vyrábí ve dvou řadách. Řada Terra je vybavená konektorem ve standardu CCS1 i CCS2 a řada HVC (napájecí skříně) jenž je sdílena i s nabíječkami pantografovými. Nabíjecí výkon dosahuje hodnot od 24 kW do 150 kW při nočním dobíjení a až 350 kW pro vodou chlazené konektory pro rychlé nabíjení. Všechny dostupné produkty umožňují nabíjení jednoho vozidla. Několik vybraných nabíječek umožňuje sekvenční nabíjení (obr. 16), kdy jsou připojeny k jedné napájecí skříně až 3 Wallboxy [53]. V momentě, kdy je ukončeno nabíjení prvního vozu, dojde k automatickému přepnutí a je nabíjen druhý vůz a následně i třetí.



Obr. 16 Princip sekvenčního nabíjení tří autobusů [53]

Pantografové stanice nabízejí rozsah nabíjecího výkonu pro noční nabíjení 50 až 150 kW a pro rychlé (příležitostné) nabíjení 150 až 600 kW. I zde je možnost sekvenčního nabíjení až tří vozidel z jedné napájecí skříně. Připojení k NS probíhá zcela automaticky. U způsobu připojení PU (Pantograph Up) pantograf na vozidle odpovídá požadavkům norem ISO 15118 (rozhraní V2G), DIN 70121 (německá norma pro DC nabíjení) a ICE 61851-23/-24 (řídící komunikace NS a EV). Připojení PD (Pantograph Down) pantograf je součástí nabíječky a je ve standardu OppCharge. Oba způsoby připojení (obr. 17) rovněž podporují i protokol OCPP (Open Charge Point Protocol) [53].



Obr. 17 Stožár PD (vlevo) a stožár PU (vpravo) [53]

Pod názvem EcoFlex ABB vyrábí modulární řešení úložišť energie pro osobní i autobusové nabíjecí sítě. Jedna jednotka je navržena tak, aby se celý vnitřní systém uložil do prostoru o rozměrech standardního nákladního kontejneru. Díky tomu je zaručena snadná manipulace se zařízením a možná přeprava kamkoliv po světě. K vnitřnímu vybavení patří bateriové úložiště s maximální kapacitou 550 kWh (Li-Ion články) a systémy pro správu a ochranu

baterie. Součástí je i usměrňovač [54]. Volitelnou výbavou jednotky může tvořit transformátor, a dokonce i nabíjecí kabelové stanice Terra (obr. 18) [55]. Hlavními funkcionalitami modulu EcoFlex jsou vyrovnávání špiček, vyrovnávání a přesouvání zátěže [54].



*Obr. 18 EcoFlex modul s dvěma nabíjecími posty [55]*

#### 4.3.2 SIEMENS

Německá technologická společnost Siemens je jednou z největších evropských technologických firem s širokým spektrem zaměření rozděleným do několika divizí. Podílí se na rozvoji průmyslové výroby, transportu a infrastruktury chytrých měst, automatizaci a péči o zdraví. Pod divizí Energy, v oblasti nabíjecí infrastruktury nejen pro bezemisní hromadnou dopravu, ale i například pro logistická centra, vyvíjí a dodávají vlastní hardware (NS) i software.

Veškeré nabízené komponenty patří do jedné produktové rodiny SICHARGE UC, která zahrnuje jak kabelové nabíjecí stanice, tak nabíjecí body pro pantografové připojení. Obdobně jako je tomu u ABB, je v nabídce řešení pantografu na nabíjecí stanici a rovněž kontaktní stříšky pro sběrače umístěné na vozidlech. I zde existuje možnost sekvenčního nabíjení, a to až pro pět vzduchem chlazených a pro tři kapalinou chlazené kabelové nabíječky, nebo v kombinaci s kontaktními stříškami. Při sekvenčním nabíjení je upřednostněna kontaktní stříška před kabelovou nabíječkou. Srdcem každého nabíjecího systému Siemens jsou nabíjecí centra (Charging Center). Jedná se o zařízení vybavená systémem kontroly nabíjení, proudovým měničem pro DC nabíjení, které je možné přímo osadit kabelovou přípojkou. Tato centra slouží primárně jako zdroje pro vysokovýkonné nabíjecí stanice [56].

Pro kabelové nabíjecí stanice (obr. 19) výrobce uvádí standardní nabíjecí výkony v rozsahu 100 až 300 kW, přičemž špičkový výkon dosahuje 400 kW. Komunikačním standardem kabelového nabíjení jsou konektory CCS1 a CCS2 [56].



*Obr. 19 Vzduchem chlazené nabíječky, stojanová (vlevo), na zeď (uprostřed) a kapalinou chlazená nabíječka (vpravo) [56]*

Nabíjecí stříšky je možné namontovat dvojím způsobem. Na vlastním stožáru, či přímo na strop depa. Udávaný nabíjecí výkon pantografových stanic je stanoven na 600 kW, špičkový na 800 kW. Komunikačním standardem pro nabíjecí stříšky je CCS, pro stanice osazené pantografem je to standard OppCharge. Příležitostně nabíjecí stanice jsou dodávány ve dvou designových variantách, líbivější varianta UD (Urban design), pro industriální zóny varianta ID (Industrial design) [56]. Obr. 20 zobrazuje trojici výše zmíněných pantografových NS:



*Obr. 20 Nabíjecí stříška (vlevo) a dvojice OppCharge stanic, UD (uprostřed) a ID (vpravo) [56]*

#### 4.3.3 PROTERRA

Předním americkým výrobcem bezemisních elektrických městských autobusů je kalifornská Proterra. Kromě navrhování a výroby elektrobusů se společnost dále specializuje na výrobu baterií, elektrických pohonných jednotek a také nabíjecí infrastruktury.

V portfoliu Společnosti Proterra jsou k nalezení čtyři nabíjecí systémy pro menší elektrobusové flotily a vlastní kabelová nabíječka s variabilním počtem CCS připojovacích kabelů (obr. 21). Dělí se podle možného výkonu nabíjecího systému. Výkon 75 kW je vhodný pro noční nabíjení, rovněž umožňuje sekvenční nabíjení až pro čtyři nabíječky [57]. Varianty 150 kW, 250 kW a 500 kW umožňují také sekvenční nabíjení pro 4, 6 a 12 vozidel [58, 59, 60]. Všechny výše



uvedené systémy podporují jak kabelové, tak pantografové nabíjení. Standardem kabelového nabíjení je konektor CCS1 [61]. Pro pantografové nabíjení platí standard J3105-1. [62]



*Obr. 21 Nabíjecí stojan Proterra [61]*

Pro řešení nabíjecí infrastruktury větších vozových parků slouží nabíjecí systém Proterra 1,5 MW na obr. 22. Modulární konstrukce umožňuje sekvenčně nabíjet až 40 elektrobusů z jediné jednotky. Při instalování není potřeba externí transformátor a rozvaděč, vše je obsaženo uvnitř [63].



*Obr. 22 Nabíjecí systém Proterra 1,5 MW [63]*

#### 4.3.4 EKOENERGETYKA

Polská společnost Ekoenergetyka je evropským leaderem v oblasti designu a výroby nabíjecí infrastruktury elektrických autobusů a těžkých vozidel. Produkty této firmy využívá například česká Škoda Transportation. V portfoliu nabízených produktů jsou k nalezení nabíjecí systémy, kabelové nabíječky i jedna pantografová stanice. Veškeré modely podléhají jak ISO 15118, tak německé normě DIN 70121. Podporují rovněž i protokol OCCP.

Pro potřeby nabíjecích stanic je v nabídce hned několik nabíjecích systémů. Největší z nich nese název Mega Charger (obr. 23) je schopen dosáhnout nabíjecích výkonů v rozsahu 1,2 až 2,2 MW. Obdobně jako u ABB, je celá konstrukce navržena v rozměrech nákladního kontejneru pro snadnou manipulaci a přepravu. Maximální počet připojených nabíječek



k tomuto systému výrobce neuvádí. Kromě Mega Chargeru je v nabídce dvojice nabíjecích systémů Core Charger F600 s výkonem 600 kW a F200 s výkonem 200 kW [64].



*Obr. 23 Ekoenergetika Mega Charger [65]*

Pro připojení vozidla k těmto systémům dodává výrobce pantografovou stanici Link Charger F500 s hodnotou nabíjecího výkonu až 500 kW. Jedná se o spojení typu SAE J-3105-2. Kabelové stanice podporují konektorový standard CCS2. Zde se výkon stanic pohybuje v rozmezí od 20 do 150 kW. Nižší výkonové stanice jsou vyráběny jak ve fixní, tak i mobilní variantě [64].

#### 4.4 OCPP

Neboli Open Charger Point Protocol je jednotným open-source (volně šiřitelný a upravovatelný) komunikačním protokolem mezi nabíjecími stanicemi a softwarem pro jejich správu. Umožňuje vzájemnou spolupráci mezi libovolnou nabíjecí stanicí a správcovským softwarem i u produktů, jež nebyly pro sebe přímo navrženy. OCPP zastřešuje OCA (Open Charge Alliance), což je společenstvím soukromých i veřejných leaderů v oblasti infrastruktury elektrických vozidel. Společným cílem je rozvoj bezemisní dopravy, a především snadná dostupnost a flexibilita nabíjecích stanic [66]. Otevřený standard jako je tento napomáhá rozvoji elektromobility jako takové, a zároveň zachovává plnou konkurenceschopnost všech výrobců.

#### 4.5 DRUHÝ ŽIVOT BATERÍ

Druhý život baterií řeší otázku opětovného využití baterií, které již nadále nemohou sloužit pro provoz elektrických vozidel. Důvodem vyřazení je konec jejich životnosti, kdy kapacita klesne pod dostačující mez. Baterie je považována za nevhodnou pro další provoz při poklesu její kapacity pod 70 % (některé zdroje uvádějí už při poklesu pod 80 %). To neznamená, že musejí být okamžitě vyřazeny a recyklovány [67]. Alternativou je jejich možnost nasazení do bateriových úložišť nabíjecích stanic, kde slouží jako vyrovnávací prvek při nabíjení vysokým výkonem mezi rozvodnou sítí a NS.

Prostřednictvím vyrovnávacích bateriových úložišť je možné zbudovat nabíjecí infrastrukturu i v místech, kde není připojení k elektrické síti nejoptimálnější.

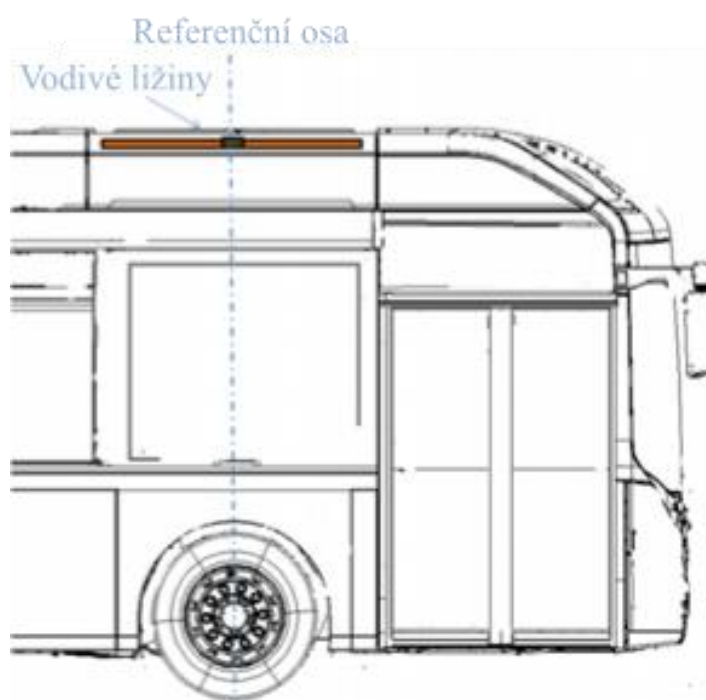
Druhým možným způsobem využití je jejich připojení k obnovitelným zdrojům energie (solární a větrné elektrárny), které nepracují 24 hodin denně, ale jen za optimálních podmínek. Za optimálních podmínek se samy nabíjí, aby v případě nepříznivého počasí (zataženo, bezvětří) zastoupily elektrárny a přímo zásobovaly síť z vlastní nashromážděné energie.

## 4.6 OPPCHARGE

Zkratka pro Opportunity charging, nebo-li příležitostné nabíjení. OppCharge je projektem snažícím se standardizovat nabíjení nejen elektrických autobusů, ale také dvoupatrových elektrických autobusů, ba i nákladní automobilové dopravy na elektrinu.

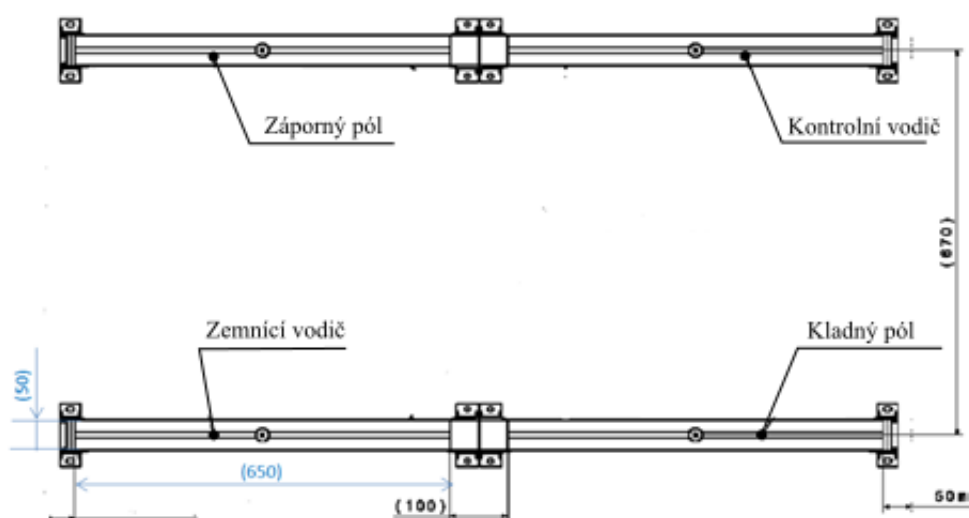
Jelikož se jedná o příležitostné nabíjení obdobně jako je tomu například u autobusů systému TOSA, jsou autobusy většinou vybaveny baterií s nižší kapacitou. Ovšem nabíjecí interval mezi jednotlivými nabíjeními je podstatně nižší než u kabelem nabíjených elektrických autobusů. Nabíjení probíhá buď přímo na zastávkách, anebo na konečné. Tam, kde je možné autobus odstavit po dobu nezbytně nutnou [68].

Nabíjení vozidel zajišťuje dvojice vodivých ližin umístěných v přední části vozu na střeše za kabinou (obr. 24). Tato poloha byla vybrána s přihlédnutím na manévrovatelnost autobusu, protože je u většiny vozidel přední náprava tou natáčecí. Je tedy mnohem snazší pro řidiče navést vůz pod NS. Jako reference k přesnému navedení slouží střed přední nápravy a vizualizace v kabině řízená pomocí vzájemné komunikace prostřednictvím Wi-Fi spojení mezi autobusem a nabíjecí stanicí [69].



Obr. 24 Umístění ližin na elektrobuse [69]

Při nabíjení dojde ke spuštění pantografu z NS na již dříve zmíněnou dvojici ližin. Díky svým kompaktním rozměrům výrazně nepřispívají k celkové výšce vozidla. I dvoupatrový autobus vybavený touto technologií splňuje standardní minimální podjezdovou výšku mostů na většině evropských dálnic, což je 4,5 metru. Výhodou je i nízká hmotnost konektorových ližin, která činí 15 kg a neomezuje vnitřní prostor pro cestující. Nabíjecí ližiny jsou osazeny celkem čtyřmi kontaktními póly (obr. 25), kladným a záporným vodičem k uzavření DC obvodu, zemí a kontrolním vodičem, který slouží ke kontrole stavu nabití baterie [68].



Obr. 25 Pohled shora na vodivé ližiny [69]

Nabíjecí výkon je v současné době nastaven na 150, 300 nebo 450 kW [69]. Horní limit dosud nebyl stanoven, Nabíjení výkonem 600 kW by však mělo být možné. Baterie jsou dobíjeny stejnosměrným proudem, není tedy zapotřebí palubní nabíječky.

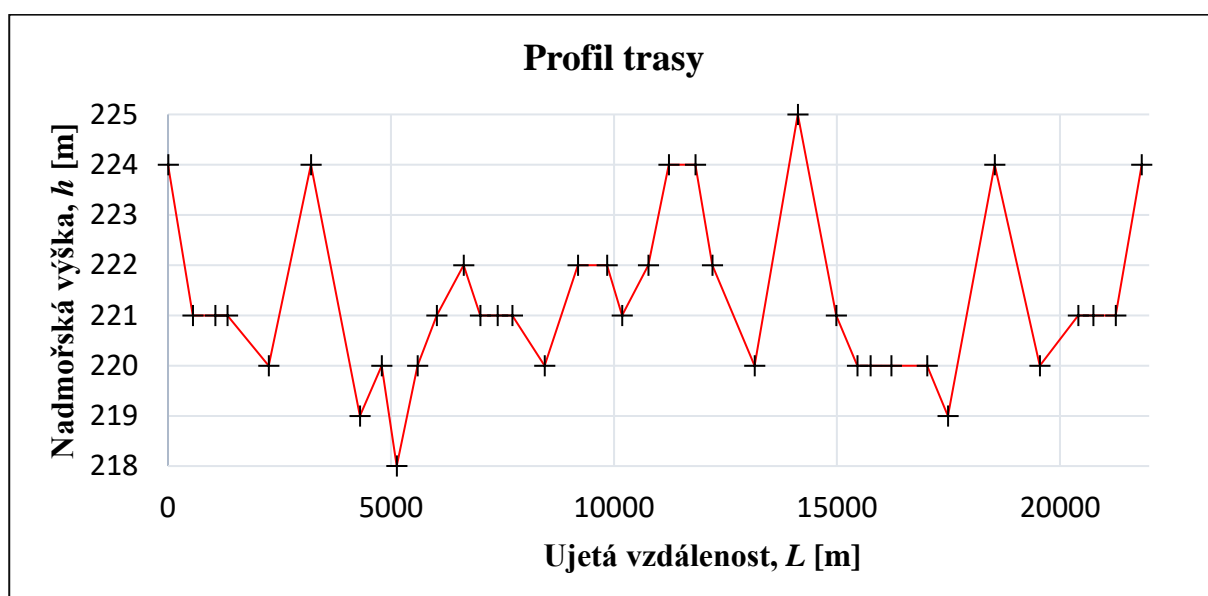
Připojení k NS a následné nabíjení probíhá zcela automaticky. Pro zajištění spojení slouží obousměrná komunikace mezi vozem a nabíjecí stanicí pomocí Wi-Fi. Prostřednictvím společného komunikačního protokolu a standardizovanému připojovacímu zařízení má dopravce na výběr z celé řady výrobců elektrobusů. Nejsou tedy limity při výběru vhodných vozidel do vozového parku splňujících individuální požadavky každého města.

Počet nabíjecích stanic využívajících jednotný standard OppCharge neustále roste. Ke květnu roku 2019 bylo vystavěno na 164 NS ve 13 zemích světa, ty dobíjejí více jak 700 autobusů.

Platforma OppCharge se těší široké podpoře ze strany samotných výrobců elektrických autobusů, i od dodavatelů nabíjecích stanic. Zmínit lze například Siemens, ABB, Volvo, Solaris, Iveco a mnoho dalších [68]. Do projektu je zapojena i ostravská EKOVA ELECTRIC, jejíž elektrobus, model EKOVA Electron je touto technologií vybaven [70] a Škoda Transportation, která přerušila vývoj vlastních rychlonabíjecích stanic a přešla rovněž na OppCharge [71].

## 5 ZHODNOCENÍ ENERGETICKÉ NÁROČNOSTI TRASY

Poslední kapitola je věnovaná návrhu a vhodnému řešení energetické náročnosti vybrané autobusové linky. Jako vzor poslouží pardubická linka č. 8. Jedná se o jednu z nejdelších a současně páteřních linek v systému MHD města Pardubic s celkovou délkou 21,8 kilometrů. Výškový profil trasy na obr. 26 se pohybuje v rozmezí 218 až 224 metrů nad mořem. Lze tedy říct, že se jedná převážně o rovinatý terén, přesto bude sklon svahu při výpočtu zohledněn. Do budoucna je plánována obsluha pouze elektrickými autobusy s nabíjecím stáním v lokalitě připravovaného terminálu jih. V lokalitě za zastávkou „Dopravní podnik,“ tedy přibližně v polovině trasy. Zhodnocení bylo provedeno pro současnou podobu této linky.



Obr. 26 Výškový profil vybrané linky

Výstupem tohoto výpočtu je potřebná energie pro absolvování celé trasy a následný návrh četnosti a délky nabíjecích cyklů. Pro zhodnocení energetické náročnosti je nezbytné vypočítat potřebnou kapacitu bateriového úložiště elektrobuse na jednu absolvovanou jízdu. Kapacitu [kWh] lze jednoduše přepočítat na práci [J]. Celkovou práci  $A_{\text{celk}}$  získáme součtem jednotlivých celkových úsekových prací  $A_{\text{úseki}}$ . K získání  $A_{\text{úseki}}$  je třeba vypočítat práci dílčích odporů [N] působících na vozidlo během jízdy jejich přenásobením dráhou [m], na které daný odpor působí. Na vozidlo působí celkem čtyři odpory: Odpor vzduchu  $O_{vi}$ , valivý odpor  $O_{fi}$ , odpor stoupání  $O_{si}$  a odpor zrychlení  $O_{zi}$ . U elektrobuse je počítáno s rekuperací při brzdění, a to s maximální účinností 60 %.

Elektrobus se během jízdy daným úsekem pohybuje nejprve rovnoměrně zrychleným pohybem do chvíle dosažení maximální rychlosti v daném úseku, následně pokračuje rovnoměrným pohybem konstantní rychlostí. Na závěr při brzdění do zastávky rovnoměrně zpomaleným pohybem do úplného zastavení vozidla v zastávce. Zastavení na semaforech a křižovatkách není zohledněno. Celý výpočet se pohybuje na horní hranici potřebné práce pro absolvování jednotlivých úseků.

Před samotným začátkem výpočtu je nezbytné si nadefinovat vstupní parametry. Vzorovým vozem je elektrobus EKOVA Electron ve standardu OppCharge. Maximální přípustná hmotnost činí 18 500 kg. Čelní plocha byla vypočtena z rozměrů uvedených výrobcem.

Součinitel vzdušného odporu byl vybrán z intervalu 05–07 (pro autobus) a stanoven na hodnotu 0,65. Zrychlení je uvažováno jako konstantní s hodnotou  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . Maximální hodnota tohoto zrychlení pro autobusy v příčném směru je udávána na  $2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

Vstupní parametry výpočtu:

Hustota vzduchu při teplotě 20 °C:  $\rho = 1,2047 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Gravitační zrychlení:  $g = 9,807 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

Zrychlení elektrobusu:  $a = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

Čelní plocha elektrobusu:  $S_x = 7,574 \text{ m}^2$

Celková hmotnost elektrobusu:  $m = 18\,500 \text{ kg}$

Součinitel vzdušného odporu:  $C_x = 0.68$

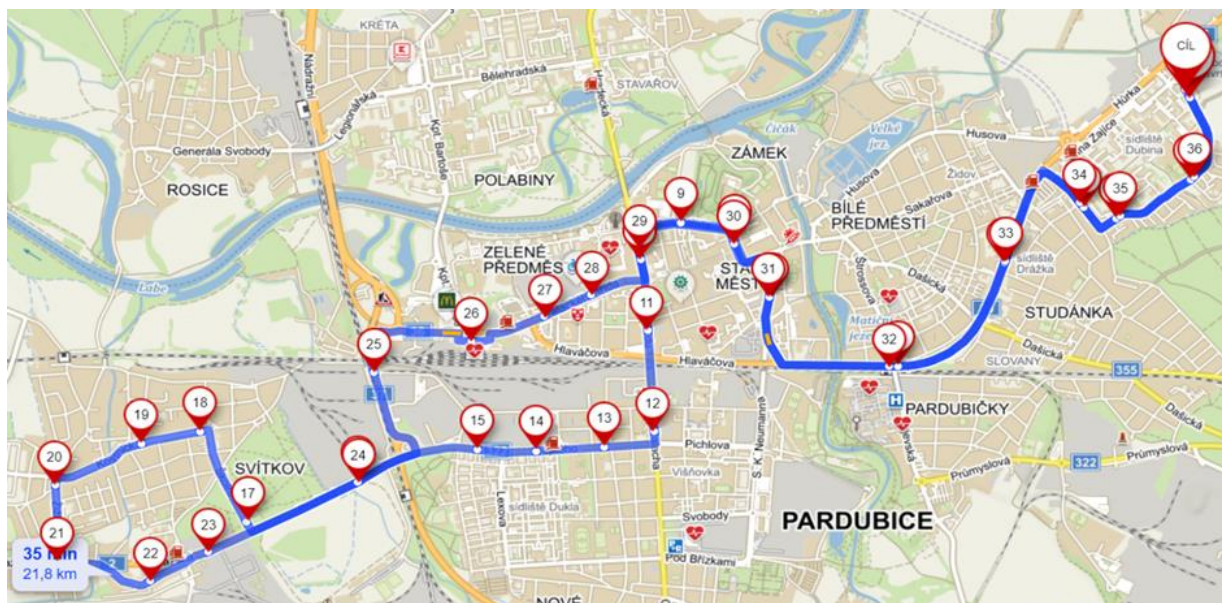
Součinitel valivého odporu:  $f = 0,02$

Součinitel rotačních částí:  $\vartheta = 1,1$

## 5.1 VÝPOČET

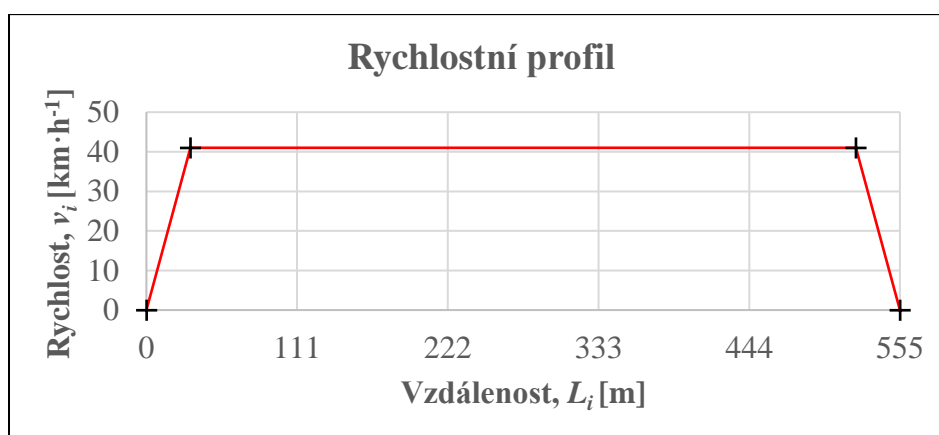
Uvedeny budou pouze obecné vztahy. Veličiny v nich zastoupené oindexované písmenem „i“ určující proměnné veličiny pro jednotlivé úseky linky. Samotný výpočet byl proveden v MS Excel (viz *příloha 1*). Data o maximální dosažené rychlosti byla naměřena pomocí aplikace GPS Speedometer. Údaje o nadmořské výšce a vzdálenostech mezi zastávkami byly získány z portálu Mapy.cz. V tabulce jsou uvedeny hodnoty maximální dosažené rychlosti v každém úseku a informativně i průměrná rychlost pro jednotlivé úseky, která se ovšem nijak do výpočtu nepromítá.

Autobus při své jízdě obslouží celkem 37 zastávek. Proto byla pro výpočet trasa rozdělena na 36 úseků se zastávkami, jakožto hraničními body, v nichž autobus zastavuje (obr. 27).



Obr. 27 Zvolená linka č. 8 s vyznačenými zastávkami [72]

Jednotlivé úseky je nutné rozdělit do 3 podúseků. Na rozjezd, jízdu konstantní rychlostí a brzdění do zastávky. Hodnota zrychlení pro rozjezd i brzdění je stejná, stejný bude i čas potřebný k dosažení maximální rychlosti stejný i pro brzdění. Totožná bude rovněž i dráha uražená při zrychlování a také brzdění. Rychlostní profil na prvním úseku je k vidění na obr. 28:



Obr. 28 Rychlostní profil na prvním úseku

Pro zjednodušení výpočtu sklonu svahu jsou jednotlivé úseky aproximovány přímkou mezi nadmořskou výškou počáteční a koncové zastávky daného úseku.

K výpočtu úhlu sklonu svahu  $\alpha_i$  poslouží následující vztah:

$$\alpha_i = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta h_i}{L_i}\right) \quad (1)$$

kde:  $\Delta h_i$  rozdíl nadmořské výšky počáteční a koncové zastávky [m]  
 $L_i$  vzdálenost mezi zastávkami na daném úseku [m]



Záporná hodnota v tabulce značí pokles svahu v daném úseku linky.

Čas potřebný k dosažení maximální rychlosti získáme ze vztahu:

$$t_{\text{rozi}} = \frac{v_i}{a} \quad (2)$$

kde:  $t_{\text{rozi}}$  čas pro dosažení maximální rychlosti [s]  
 $v_i$  maximální dosažená rychlost v daném úseku [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Dráha uražená během této doby vypočítáme ze vztahu:

$$s_{\text{rozi}} = \frac{a \cdot t_{\text{rozi}}^2}{2} \quad (3)$$

Kde:  $s_{\text{rozi}}$  délka ujeté dráhy při rozjezdu [m]

Dráha při jízdě stálou rychlostí:

$$s_{\text{si}} = v_i \cdot t_{\text{si}} \quad (4)$$

kde:  $s_{\text{si}}$  délka ujeté dráhy stálou rychlostí [m]  
 $t_{\text{si}}$  čas jízdy stálou rychlostí [s]

### 5.1.1 VALIVÝ ODPOR

Při valivém pohybu kruhového tělesa, v našem případě pneumatiky po podložce (vozovce), dochází ke vzniku valivého odporu. Jedná se o přímou reakci na deformaci obou těles. Míra této deformace odpovídá tuhosti těchto těles, tedy pokud například je vozovka dostatečně tuhá, deformuje se pouze pneumatika a naopak. Deformace pneumatiky je přímo závislá na jejím nahuštění [73]. Jelikož na velikosti tohoto odporu se nemalou mírou podílí tíhová síla vozidla  $G$ , dá se očekávat, že valivý odpor bude mít největší podíl na výsledné práci. Součinitel valivého odporu  $f$  je spjatý s materiálem vozovky. Čím je kvalitnější, tím menších hodnot nabývá. Velikost valivého odporu závisí ještě také na jedné veličině, kterou je úhel sklonu svahu  $\alpha_i$ . Se zvyšujícím se úhlem sklonu svahu valivý odpor klesá.

Valivý odpor [74]:

$$O_{fi} = f \cdot G \cdot \cos \alpha_i \quad (5)$$

kde:  $O_{fi}$  valivý odpor daného úseku [N]  
 $f$  součinitel valivého odporu [-]  
 $G$  tíhová síla vozidla [N]  
 $\alpha_i$  úhel sklonu svahu [ $^\circ$ ]

Tíhová síla vozidla:

$$G = m \cdot g \quad (6)$$

kde:  $m$  celková hmotnost autobusu [kg]  
 $g$  gravitační zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ]

Valivý odpor je pro nízké rychlosti v městském provozu považován za konstantní. Pro získání práce valivého odporu jej stačí vynásobit dráhou.

Práce valivého odporu při rozjezdu:

$$A_{\text{fri}} = O_{\text{fi}} \cdot s_{\text{rozi}} \quad (7)$$

kde:  $A_{\text{fri}}$  práce valivého odporu daného úseku při rozjezdu [J]

Práce valivého odporu při jízdě stálou rychlostí:

$$A_{\text{fsi}} = O_{\text{fi}} \cdot s_{\text{si}} \quad (8)$$

kde:  $A_{\text{fsi}}$  práce valivého odporu při jízdě stálou rychlostí [J]

### 5.1.2 ODPOR VZDUCHU

Odpor vzduchu je odpovídající reakcí prostředí na relativní pohyb vozidla, působí v opačném směru, než je směr pohybu. Na velikosti tohoto odporu se podílí velikost čelní plochy vozidla. U autobusů se jedná převážně o obdélníkový průřez. U zkoumaného elektrobusu je čelní stěna převážně obdélníková v horní části ubíhající dozadu. Z tohoto důvodu je součinitel vzdušného odporu  $C_x$  uvažován a z horní hranice intervalu. Dále je velikost odporu ovlivněna hustotou okolního prostředí, tedy vzduchu, a ta se podle teploty mění. Zvolená hodnota hustoty vzduchu  $\rho$  je pro teplotu 20 °C [73]. Rychlost je v tomto vztahu relativní, pokud tedy jede autobus například do protivětru, je třeba vektory těchto rychlostí sečíst. V našem případě je uvažováno bezvětří.

Odpor vzduchu [74]:

$$O_{\text{vi}} = C_x \cdot S_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_i^2 \quad (9)$$

kde:  $O_{\text{vi}}$  odpor vzduchu pro daný úsek [N]  
 $C_x$  součinitel odporu vzduchu [-]  
 $S_x$  čelní plocha autobusu [ $\text{m}^2$ ]  
 $\rho$  hustota vzduchu při teplotě 20 °C [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]



Odpor vzduchu je veličinou závislejší na rychlosti pohybujícího se vozidla. Proto je třeba při výpočtu této práce při zrychlování vozidla použít následující integrační vztah, kde za rychlost dosadíme substitucí  $v = a \cdot t$  [73]:

$$A_{vri} = \int_0^{s_{rozi}} O_{vi} \cdot ds = \int_0^{s_{rozi}} O_{vi} \cdot v \cdot dt = \int_0^{t_{rozi}} C_x \cdot S_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot a^3 \cdot t^3 \cdot dt \quad (10)$$

kde:  $A_{vri}$  práce odporu vzduchu při rozjezdu [J]

Vztah pro práci vykonanou odporem vzduchu při rozjezdu po integraci rovnice (10):

$$A_{vri} = C_x \cdot S_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot a^3 \cdot \frac{t_{rozi}^4}{4} \quad (11)$$

Práce odporu vzduchu při jízdě stálou rychlostí:

$$A_{vsi} = O_{vi} \cdot s_{si} \quad (12)$$

kde:  $A_{vsi}$  práce odporu vzduchu při jízdě stálou rychlostí [J]

### 5.1.3 ODPOR STOUPÁNÍ

Odpor stoupání se projevuje pouze při jízdě po nakloněné rovině, a to až při jízdě do kopce, nebo naopak z kopce. Při jízdě po rovině je tento odpor roven nule. Na tomto odporu se zrychlení či vlastní rychlost autobusu neprojevuje, ale projevuje se gravitační zrychlení a hmotnost vozidla. Úhel sklonu svahu rovněž ovlivňuje velikost odporu stoupání [73]. Práce vyvolaná tímto odporem představuje změnu potenciální energie autobusu. Při jízdě do kopce je zapotřebí vynaložit práci na překonání tohoto odporu. Při klesání tento odpor napomáhá při jízdě z kopce, vykonaná práce je záporná.

Odpor stoupání [74]:

$$O_{si} = G \cdot \sin \alpha_i \quad (13)$$

kde:  $O_{si}$  odporu stoupání [N]

Práce odporu stoupání při rozjezdu:

$$A_{sri} = A_{sbi} = O_{si} \cdot s_{rozi} \quad (14)$$

kde:  $A_{sri}$  práce odporu stoupání při rozjezdu [J]

$A_{sbi}$  práce odporu stoupání při brzdění [J]

Práce odporu stoupání při jízdě stálou rychlostí:

$$A_{ssi} = O_{vi} \cdot s_{si} \quad (15)$$

kde:  $A_{ssi}$  práce odporu stoupání při stálé rychlosti [J]

#### 5.1.4 ODPOR ZRYCHLENÍ

Mezi možná další pojmenování patří dynamický odpor, či odpor setrvačnosti. Odpor zrychlení je setrvačnou silou působící proti směru zrychlení vozidla. Skládá se ze dvou odporů. Z odporu zrychlení posuvné části (2. Newtonův zákon) a odporu zrychlení rotujících částí, který reflektuje momenty setrvačnosti jednotlivých rotujících částí (kola, převodovka a motor). Pro zjednodušení výpočtu je odpor rotačních částí zastoupen součinitelem rotačních částí  $\vartheta$  [73]. Při zrychlování vozidla odpor zrychlení koná práci, naopak při brždění je práce tohoto motoru využita k rekuperaci energie. Rekuperace je zohledněna přidáním rekuperačního faktoru  $k_r$ , který byl stanoven na 60 %.

Odpor zrychlení [74]:

$$O_{zi} = m \cdot a \cdot \vartheta \quad (16)$$

kde:  $O_{zi}$  odporu zrychlení [N]

$\vartheta$  součinitel rotačních částí [-]

Práce odporu zrychlení při rozjezdu:

$$A_{zri} = O_{zi} \cdot s_{rozi} \quad (17)$$

kde:  $A_{zri}$  práce odporu zrychlení při rozjezdu [J]

Při jízdě konstantní rychlostí je hodnota zrychlení nulová. Odpor zrychlení nekoná práci.

Práce odporu zrychlení při stálé rychlosti:

$$A_{zsi} = O_{di} \cdot ss_i = 0 \text{ J} \quad (18)$$

kde:  $A_{zsi}$  práce odporu zrychlení při stálé rychlosti [J]

Práce odporu zrychlení při brždění:

$$A_{zbi} = O_{zi} \cdot s_{ri} \cdot k_r \quad (19)$$

kde:  $A_{zbi}$  práce odporu zrychlení při brždění [J]

$k_r$  rekuperační faktor [-]

#### 5.1.5 POTŘEBNÁ KAPACITA

Výslednou úsekovou práci  $A_{úseki}$  získáme sečtením dílčích prací jednotlivých odporů. K získání celkové práce  $A_{celk}$  zvolené linky opětovně sečteme, v tomto případě jednotlivé úsekové práce:

$$A_{celk} = \sum_{i=1}^{36} A_{úseki} \quad (20)$$

$$A_{\text{úseki}} = A_{\text{fri}} + A_{\text{fsi}} + A_{\text{vri}} + A_{\text{vsi}} + A_{\text{sri}} + A_{\text{ssi}} + A_{\text{sbi}} + A_{\text{zri}} + A_{\text{zbi}}$$

$$A_{\text{celk}} = 10505132 \text{ J} = 103,7 \text{ MJ}$$

kde:  $A_{\text{celk}}$  práce odporu zrychlení při stálé rychlosti [J]

$A_{\text{úseki}}$  úseková práce [J]

Jelikož v praxi se celková energie baterie  $E_{\text{celk}}$  udává v kWh, je vhodné vypočtenou celkovou práci  $A_{\text{celk}}$  [J] převést do těchto jednotek. Z definice 1 W odpovídá práci 1 J vykonané za dobu 1 s. Jednoduchou úpravou dostáváme ekvivalentní vyjádření: 1 J odpovídá 1 Ws (Wattsekunda).

Převodní vztah:

$$E_{\text{celk}} = \frac{A_{\text{celk}}}{3,6 \cdot 10^6} = 28,8 \text{ kWh} \quad (21)$$

kde:  $C_{\text{celk}}$  potřebná kapacita bateriového úložiště na jednu jízdu [kWh]

## 5.2 VHODNÉ ŘEŠENÍ NABÍJENÍ

Zvolený elektrobus EKOVA Electron je osazen BÚ o celkové kapacitě 86 kWh ve dvou jednotkách. Baterie je typu LTO (Lithium-Titanite Oxide). Pro potřeby vytápění, klimatizace a případného návratu do depa je rezerva v baterii zohledněna pomocí bezpečnostního faktoru  $k_b = 1,4$ . Maximální potřebnou energii baterie  $E_{\text{max}}$  získáme přenásobením celkové energie baterie tímto faktorem:

$$E_{\text{max}} = E_{\text{celk}} \cdot k_b = 28,8 \cdot 1,4 = 40,3 \text{ kWh} \quad (22)$$

kde:  $E_{\text{max}}$  maximální celková energie baterie [kWh]  
 $k_b$  bezpečnostní faktor [-]

Nyní už je možné získat počet ujetých celých jízd na jedno plné nabití baterie:

$$n = \frac{C_{\text{celk}}}{E_{\text{mcelk}}} = \frac{86}{40,331} = 2,1 \quad (23)$$

kde:  $n$  maximální počet jízd na jedno nabití baterie [-]

Nabíjecí stanice standardu OppCharge umožňují nabíjení baterie výkonem 150, 300 až 450 kW. Čas nezbytný k plnému nabití baterie, uvažujeme-li, že dojde k plnému vybití při jízdě, získáme podělením celkové kapacity baterie  $C_{\text{celk}}$  nabíjecím výkonem  $P_n$ . Abychom získali čas v jednotkách SI sekundách, je nezbytné převést kWh na kW s pomocí převodního vztahu: 1 kWh odpovídá 3600 kW s. Nyní už je možné pro jednotlivé nabíjecí výkony dopočítat potřebný čas pro plné nabití baterie. Pro jednodušší představu je výsledný čas v sekundách převeden na přibližnou hodnotu v minutách.

Vztah pro výkon 150 kW:

$$t_{150} = \frac{C_{\text{celk}}}{P_n} = \frac{86 \cdot 3600}{150} = 2064 \text{ s} \cong 34 \text{ min} \quad (24)$$

kde:  $t_{150}$  nabíjecí čas pro výkon 150 kWh [s]  
 $P_n$  nabíjecí výkon [kW]

Pro výkon 300 kW:

$$t_{300} = \frac{C_{\text{celk}}}{P_n} = \frac{86 \cdot 3600}{300} = 1032 \text{ s} \cong 17 \text{ min} \quad (25)$$

kde:  $t_{300}$  nabíjecí čas pro výkon 300 kWh [s]

Pro výkon 450 kW:

$$t_{450} = \frac{C_{\text{celk}}}{P_n} = \frac{86 \cdot 3600}{450} = 688 \text{ s} \cong 11,5 \text{ min} \quad (26)$$

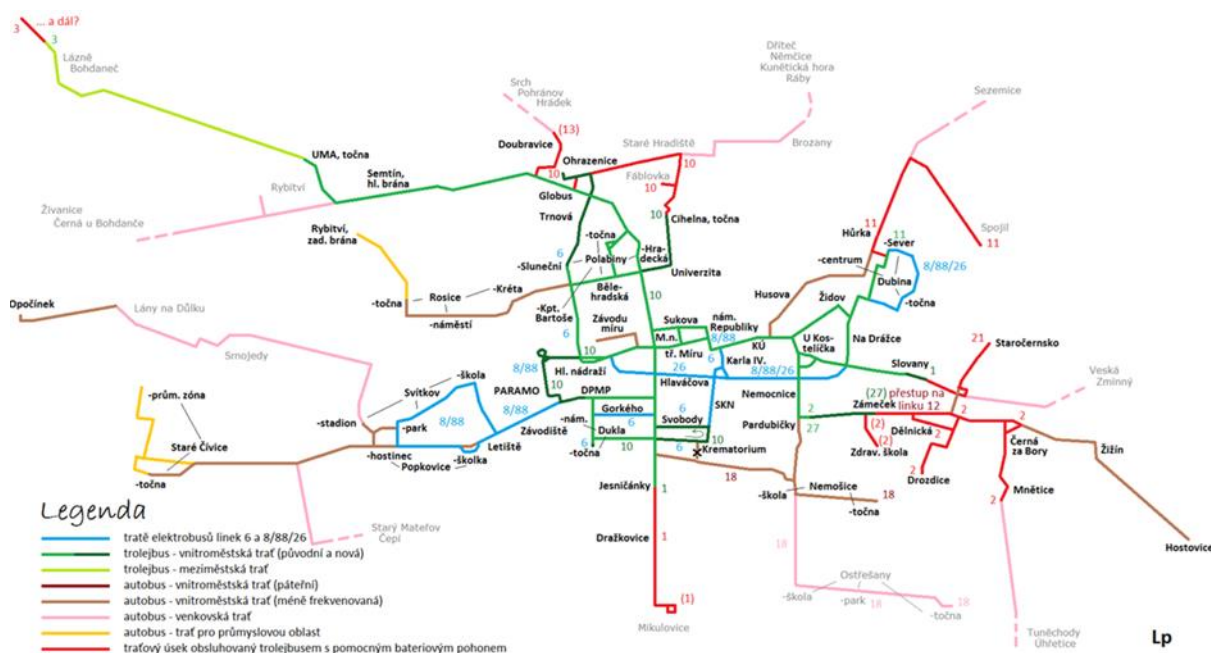
kde:  $t_{450}$  nabíjecí čas pro výkon 450 kWh [s]

Při průměrné současné čekací době autobusu na konečné stanici mezi jednotlivými jízdami 13 minut, se jako jediné možné řešení jeví čas  $t_{450} \cong 11,5$  min, tedy pro nabíjecí výkon 450 kW. Tento výsledek platí pouze pro úplné vybití baterie, ke kterému by došlo až po absolvování dvou turnusů. Při možnosti nabíjení po každé jednotlivé jízdě, tedy při nabíjení na přibližně 50 % kapacity baterie, by bylo možné snížit výkon nabíjecí stanice na 300 kW. Pro takový scénář by na nabití autobusu stačilo nově přibližně 8,5 minut. Při nabíjení na poloviční kapacitu lze životnost a počet nabíjecích cyklů baterie zdvojnásobit, neboť jeden celý cyklus baterie představuje proces úplného vybití (0 % kapacity) plně nabité baterie (100 % kapacity).

## ZÁVĚR

Širší zájem o elektrické autobusy a elektromobilitu samotnou můžeme pozorovat až od přelomu letopočtu. Počáteční izolovanost jednotlivých přístupů k řešení postupně mizí a je možné jednoznačně určit několik význačných trendů, které přerostly v univerzální standardy. Jednotný způsob připojení umožňuje snadnější implementaci a uvolňuje finance, které je možné investovat do dalšího rozvoje, například do technologie bateriových článků.

U trolejbusů je největší překážkou v dalším rozvoji vybudování zcela nové trolejové traktce, protože sama o sobě je nesmírně nákladnou investicí. Náklady na zbudování jednoho kilometru vyjdou na desítky milionů korun. Nejen proto je možné pozorovat téměř nulovou novou výstavbu. Tendence je spíše v dostavbě již stávajících trolejových tratí. Příkladem může být již dříve zmíněný DPMP s jeho vizí pro rok 2025 na obr. 29 níže. Lze jednoznačně definovat trend, kdy města s rozvinutou trolejovou sítí volí spíše přístup dostavby několika málo úseků, které umožní obsluhu většiny městských linek pomocí parciálních autobusů. V kontrastu k přístupu Pardubic může být řešení města Hradce Králové, které rovněž má zavedenou obsluhu trolejovými autobusy, avšak není natolik rozsáhlá. Z tohoto důvodu DPMHK řeší bezemisní městskou hromadnou dopravu výhradně pomocí elektrických bateriových autobusů.



Obr. 29 Vize rozložení jednotlivých traktcí s provozem elektrobusů pro rok 2025 [75]

Jak lze jednoznačně vidět z ukázkového výpočtu kapacity baterie je nejvýraznějším faktorem ovlivňujícím energetickou náročnost právě hmotnost vozidla, na kterou má nezanedbatelný podíl velikost úložiště energie. Při rychlém nabíjení až 600 kW, je možné dobít baterii elektrobusu v řádech minut. Není tak problémem zakomponovat nabíjecí cyklus do přestávek mezi jednotlivými jízdami. Právě krátká doba nabíjení umožňuje baterie elektrobusů dimenzovat na dojezd na jedno nabití na pouhých 30+ kilometrech s plánovaným nabíjením po každé absolvované jízdě.

Princip zastávkového nabíjení, jenž je k nalezení například v projektu TOSA, lze bateriové úložiště zmenšit daleko více až na úroveň velikosti baterie elektromobilu. S možností plně

automatizovaného připojení v průběhu stání v zastávce během její obsluhy, má elektrobuses šanci přímé konkurence pro klasické autobusy. Zastávkového nabíjení lze rovněž docílit i bezkontaktně, a to při využití indukčního nabíjení, které je zakomponované přímo do vozovky zastávky. Pro odstranění problému rychlého nabíjení s nevyrovnaností úrovně nabití jednotlivých článků, je zapotřebí alespoň jednou denně články stabilizovat pomocí pomalého nabíjení nízkým výkonem.

Díky jednotnému standardu pro rychlé nabíjení, jakým je OppCharge a pro pomalé kabelové nabíjení jakým jsou CCS konektory, nejsou provozovatelé elektrických autobusů odkázáni jen a pouze na konkrétní řešení každého výrobce. Na výběr mají z celé řady výrobců elektrobuses a k nim, nezávisle na nich, zvolit řešení nabíjecí infrastruktury od zcela jiného výrobce tak, aby maximálně vyhovovalo potřebám každého provozovatele.

V koncepci chytrých měst má bezemisní hromadná doprava na elektrický pohon neodmyslitelné místo. Se zapojením bateriových úložišť čerpajících energii z obnovitelných zdrojů, jakými jsou například solární elektrárny na veřejných budovách nebude nadále nutné využívat pro provoz této veřejné infrastruktury rozvodné sítě. Rozvodná síť je zásobována energií z tzv. energetického mixu. Tímto termínem je označováno poměrné zastoupení veškerých zdrojů elektrické energie (fosilní, obnovitelné i jaderné). S klesající pořizovací cenou a snadnou implementací do nové i stávající zástavby je předpokládáno navýšení zastoupení obnovitelných zdrojů ve městech samotných, které umožní širší využití elektrických autobusů. Technologie V2G (Bus2Grid) umožní navracet nevyužitou „zelenou“ energii nazpět do sítě, kdy je potřeba kompenzovat vysokou poptávku z energie získané během nočního nabíjení. V Londýně kapacita Bus2Grid u současného vozového parku čítajícího 28 elektrických autobusů dosahuje 1 MW [76].

Jelikož je technologie elektrických autobusů relativně mladá musí provozovatelé systémů elektrické autobusové dopravy počítat s vyššími pořizovacími cenami, které jsou dvakrát až třikrát vyšší než u autobusů se spalovacími motory. Jistou kompenzací v dlouhodobém měřítku jsou provozní náklady přepočítané na kilometr, kde je situace naprosto opačná. V ceně nového elektrobusesu je zrcadlen i fakt, že počty vyrobených elektrických autobusů se uvádějí spíše v jednotkách, či desítkách kusů. Na nákup bezemisních vozidel městské hromadné dopravy v České republice je možné využít dotací z programu IROP (Integrovaný regionální operační program) s platností do roku 2027, který nahradil předchozí program IROP z období 2014 až 2020. Tyto dotační programy mají za cíl zvýšení bezpečnosti a efektivity městské hromadné dopravy a zároveň snížení emisí škodlivin do ovzduší v městech a okolí.

I když existuje množství skvělých způsobů a řešení nabíjecí infrastruktury, jakými jsou společné standardy, jednotné nabíjecí rozhraní a otevřený volně upravitelný software umožňující téměř srovnatelnou výkonost jakou disponují klasické autobusy, vývoj nových technologií neustává. Trendy jsou následující – navýšení nabíjecích výkonů umožňujících dalšího zmenšení velikosti bateriového úložiště tvořící značnou část hmotnosti i pořizovací ceny vozidla a zároveň co možná nejvyšší možný nájezd na jedno nabití baterie. Široké spektrum výrobců autobusů i nabíjecí infrastruktury umožňuje provozovatelům vybrat co možná nejvhodnější řešení odpovídající nejen systému hromadné dopravy města, ale přímo potřebám každé jedné linky individuálně.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] GUARNIERI, M. Looking back to electric cars. In: *2012 Third IEEE HISTory of ELection-technology CONference (HISTELCON)* [online]. IEEE, 2012, s. 1-6 [cit. 2020-12-05]. ISBN 9781467330794. Dostupné z: doi:10.1109/HISTELCON.2012.6487583
- [2] BRODIE, James. HISTORY OF THE EV. *Auto Express* [online]. London: Dennis Publishing, 2017, (1487), 34-35 [cit. 2020-12-05]. ISSN 09548866. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/2035637231/>
- [3] World's First Electric Motor by Anyos Jedlik. In: UPS Battery Center.com [online]. 4.června 2018 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <https://www.upsbatterycenter.com/blog/first-model-electric-car-1828/>
- [4] Electromote. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Electromote>
- [5] What is this that roareth thus?; Electrobuses. *The Economist* [online]. London: The Economist Intelligence Unit N.A., Incorporated, 2007, **384**(8545), 8 [cit. 2020-12-12]. ISSN 00130613. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/223987907/>
- [6] Are Electric Buses the Future of Transportation? *Gogo Charters* [online]. Gogo Charters, 2017 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z: <https://gogocharters.com/blog/electric-buses-future-transportation/>
- [7] Your bus is running approximately 100 years late. *The Earthbound Report* [online]. 2007, 2018 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z: <https://earthbound.report/2018/04/23/your-bus-is-running-approximately-100-years-late/>
- [8] LI, Jing-quan. Battery-electric transit bus developments and operations: A review. *International journal of sustainable transportation* [online]. Taylor & Francis, 2016, **10**(3), 157-169 [cit. 2020-12-19]. ISSN 1556-8318. Dostupné z: doi:10.1080/15568318.2013.872737
- [9] Shenzhen's silent revolution: world's first fully electric bus fleet quietens Chinese megacity. *The Guardian* [online]. London (UK): Guardian News & Media, 2018 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <https://www.theguardian.com/cities/2018/dec/12/silence-shenzhen-world-first-electric-bus-fleet>
- [10] The U.S. Has a Fleet of 300 Electric Buses. China Has 421,000. *Bloomberg* [online]. New York (NY): Bloomberg, 2019 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-05-15/in-shift-to-electric-bus-it-s-china-ahead-of-u-s-421-000-to-300>
- [11] Seznam sítí trolejbusové dopravy v Evropě In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-02-10]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Seznam\\_s%C3%ADt%C3%AD\\_trolejbusov%C3%A9\\_dopravy\\_v\\_Evrop%C4%9B](https://cs.wikipedia.org/wiki/Seznam_s%C3%ADt%C3%AD_trolejbusov%C3%A9_dopravy_v_Evrop%C4%9B)

- [12] 25 LET TROLEJBUSOVÉ DOPRAVY. Dopravní podnik města České Budějovice. *DPMCB.cz* [online]. ©2009-2021 [cit. 2020-02-11]. Dostupné z: <https://www.dpmcb.cz/o-nas/historie-spolecnosti/25-let-trolejbusove-dopravy.html>
- [13] Z autobusu trolejbusem a zase zpátky. V Praze vyrostla kilometrová trať. Česká televize [online]. ©1996-2021 [cit. 2021-02-15] Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/regiony/2271196-autobus-ve-stoupani-zvedne-pantograf-praha-oprasuje-zaslou-slavu-trolejbusu>
- [14] Trolejbusy a elektrické autobusy Škoda Electric ve velké galerii. *Auto.cz* [online]. ©2001-2021 [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/trolejbusy-a-elektricke-autobusy-skoda-electric-ve-velke-galerii-131009>
- [15] Trolejbus 35 TR. *Škoda* [online]. ©2021 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.skoda.cz/reference/trolejbus-35-tr/?from=prod>
- [16] Top Companies to Dominate the Electric Buses Sales Market in the Coming Years. *eCoachmanager* [online]. ©2016 [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: <https://ecoachmanager.com/top-companies-to-dominate-the-electric-buses-sales-market-in-he-coming-years/>
- [17] Elektrobuses s rychlodobíjením. *Škoda* [online]. ©2021 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.skoda.cz/reference/elektrobuses-s-rychlodobijenim/?from=prod>
- [18] Elektrobuses se standardním dobíjením. *Škoda* [online]. ©2021 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.skoda.cz/reference/elektrobuses-se-standardnim-dobijenim/?from=prod>
- [19] Elektrobuses s oportunním dobíjením. *Škoda* [online]. ©2021 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.skoda.cz/reference/elektrobuses-s-oportunnim-dobijenim/?from=prod>
- [20] Elektrobuses. *ekova.cz* [online]. ©2021 [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: <https://www.ekova.cz/cz/produkty-a-sluzby/elektrobuses.html>
- [21] Ekova Electron: nový český elektrobuses se představuje. *Proelektrotechniky.cz* [online]. 10. listopadu 2015, ©2012-2021 [cit. 2020-02-21] Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/elektromobilita/199.php>
- [22] 4. Měnírny a napájecí kabely. *Stránky trolejbusu 353* [online]. 03. ledna 2011 [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: <http://www.trolejbus.cz/kniha4.htm>
- [23] PODIVÍN, Ladislav. *RE: Materiály k BP* [e-mail] 23. února 2021 [cit. 2021-02-23].
- [24] PODIVÍN, Ladislav. *RE: Materiály k BP* [e-mail] 24. února 2021 [cit. 2021-02-24].
- [25] ČSN EN 50149. *Drážní zařízení – Pevná drážní zařízení – Elektrická trakce – Profilový trolejový vodič z mědi a slitin mědi*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. Třídící znak 34 1558.



- [26] ČSN 33 3516. *Předpisy pro trakční vedení tramvajových a trolejbusových drah*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. Třídící znak 33 3516.
- [27] Drát trolejový Cu Ri 100mm<sup>2</sup>. In: *Elektroline* [online]. [cit. 2021-02-27]. Dostupné z: [https://www.elektroline.cz/product\\_detail.php?id=271110&g=159](https://www.elektroline.cz/product_detail.php?id=271110&g=159)
- [28] Smart Trolley Grid: Project description. *TU Delft* [online]. [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: <https://www.tudelft.nl/en/eemcs/the-faculty/departments/electrical-sustainable-energy/dc-systems-energy-conversion-storage/research/smart-trolley-grid>
- [29] *STG: The electrical bus for the future* [online]. [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: <https://www.smarttrolleygrid.com/>
- [30] Využití rekuperované energie z trolejbusové sítě pro nabíjení elektromobilů. *Československý dopravák: doprava – technika – urbanismus* [online]. ©2017 [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: <https://csdopravak.squarespace.com/zpravy/2018/8/24/vyuit-rekuperovan-energie-z-trolejbusov-st-pro-nabjen-elektromobil>
- [31] Free knowledge area. *trolley:motion* [online]. ©2021 [cit. 2021-04-02] Dostupné z: <https://www.trolleymotion.eu/freier-wissensbereich/>
- [32] KOZUBÍK, Libor. Technický pokrok v oblasti akumulátorových baterií. In: *Residit. FCC Public* [online]. ©2014-2021 [cit. 2021-03-06]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/data-ftp-user/konference/2013/emob/07-amper-2013-pemb-kozubik-ibm.pdf>
- [33] Bateriové systémy. *KRAJICzech* [online]. ©2021 [cit. 2021-03-06]. Dostupné z: <https://www.krajiczeczech.cz/content/7-bateriove-systemy>
- [34] BECK, Anton. Lithium iron phosphate vs Lithium-ion: Differences and advantages. In: *epec: Engineered Technologies* [online]. 2019, ©2021 [cit. 2021-03-06] Dostupné z: <https://blog.epectec.com/lithium-iron-phosphate-vs-lithium-ion-differences-and-advantages>
- [35] Lithium-titanate battery. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2021-03-06]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-titanate\\_battery](https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-titanate_battery)
- [36] PISTOIA, Gianfranco. Chapter 5 - Vehicle Applications: Traction and Control Systems. *Battery Operated Devices and Systems*. Elsevier B.V, 2009, s. 321-378. ISBN 9780444532145. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-53214-5.00005-4
- [37] Kloubové elektrobusy Hess s průběžným dobíjením ABB TOSA na zkoušku v Paříži. *Proelektrotechniky.cz* [online]. 18. prosince 2015, ©2012-2021 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/elektromobilita/209.php>
- [38] LOMBARDO, Tom. The Reality of eBus Flash-Charging: Engineering.com cuts through the hype of the eBus that charges in seconds. In: *Engineering.com* [online]. ©2021 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/story/the-reality-of-ebus-flash-charging>

- [39] ABB. In: *Taking charge: Flash-charging is just the ticket for clean transportation* [online]. [cit. 2021-03-15].  
Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106713A9015&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [40] Hitachi ABB Power Grids. TOSA – a breakthrough e-bus charging innovation from ABB for sustainable urban transport in Geneva. In: *Youtube* [online]. 15.7.2016 [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=fm3\\_N4Js3Nw](https://www.youtube.com/watch?v=fm3_N4Js3Nw)
- [41] GATON, Bryce. What is CCS Charging?. In: *The Driven: Electric Vehicles Insiders* [online]. 10. prosince 2018 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://thedriven.io/2018/12/10/what-is-ccs-charging/>
- [42] Combined Charging System. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Combined\\_Charging\\_System](https://en.wikipedia.org/wiki/Combined_Charging_System)
- [43] KANE, Mark. CCS Combo Charging Standard Map: See Where CCS1 And CCS2 Are Used. In: *InsideEVs: Electric Vehicle News, Reviews, and Reports* [online]. 15. února 2021 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://insideevs.com/news/488143/ccs-combo-charging-standard-map-ccs1-ccs2/>
- [44] ITT [online]. Liquid Cooled CCS1 & CCS2 High Power Charging Solutions. ©2018. [cit. 2021-04-07].  
Dostupné z: <https://www.ittcannon.com/Core/medialibrary/ITTCannon/website/Literature/Catalogs-Brochures/ITT-Cannon-EVC-DC-Liquid-Cooled-Brochure.pdf?ext=.pdf>
- [45] ETING, Mark. Ebusco and Rocsys are working together to automate bus depots. In: *Ebusco®: Made to move people* [online]. 24. listopad 2020, ©2021 [cit. 2021-05-02].  
Dostupné z: <https://www.ebusco.com/ebusco-and-rocsys-are-working-together-to-automate-bus-depots/>
- [46] SHUTTLEWORTH, Jennifer. SAE publishes On-Route Mechanized Conductive EV Charging Systems Recommended Practices. In: *SAE International* [online]. 5. února 2020, ©2021 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://www.sae.org/news/2020/02/sae-j3105-promotes-safe-charging-for-buses-and-heavy-duty-vehicles>
- [47] SAE J3105. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/SAE\\_J3105](https://en.wikipedia.org/wiki/SAE_J3105)
- [48] Kloubové elektrobusy Hess s průběžným dobíjením ABB TOSA na zkoušku v Paříži. *Proelektrotechniky.cz* [online]. 4. října 2013, ©2012-2021 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/elektromobilita/56.php>
- [49] HARÁK, Martin. Opportunity Charging via pantograph. In: *Urban transport Magazine: Public Transport in Cities and Regions around the World* [online]. 17. srpna 2020 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://www.urban-transport-magazine.com/en/ceske-budjovice-electric-midibuses-charging-under-catenary/>

- [50] Stäubli [online]. *Automatic Rapid Charging Solution QCC. Applications/Special Catalogues*. ©2019. [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: [https://ec.staubli.com/AcroFiles/Catalogues/SZ\\_APP-RapidCharge-11014166\\_\(en\)\\_hi.pdf](https://ec.staubli.com/AcroFiles/Catalogues/SZ_APP-RapidCharge-11014166_(en)_hi.pdf)
- [51] BI, Zicheng, Lingjun SONG, Robert DE KLEINE, Chunting Chris MI a Gregory A KEOLEIAN. Plug-in vs. wireless charging: Life cycle energy and greenhouse gas emissions for an electric bus system. *Applied energy* [online]. Elsevier, 2015, **146**, 11-19 [cit. 2021-04-18]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2015.02.031
- [52] BI, Zicheng, Robert KLEINE a Gregory A. KEOLEIAN. Integrated Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Model for Comparing Plug-in versus Wireless Charging for an Electric Bus System. *Journal of Industrial Ecology* [online]. 2017, **21**(2), 344-355 [cit. 2021-04-18]. ISSN 1088-1980. Dostupné z: doi:10.1111/jiec.12419
- [53] ABB [online]. *Smarter Mobility*. ©2019. [cit. 2021-04-26]. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107991A6983&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [54] ABB [online]. *EcoFlex Energy Storage Module*. ©2019. [cit. 2021-04-26]. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1VPD110001A0578&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [55] ABB [online]. *E-mobility high-power enclosure*. ©2019. [cit. 2021-04-26]. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1VPD110001A0554&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [56] Siemens [online]. *SICHARGE UC. Powerful Charging solution for your electric fleet*. ©2021 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:22b45a08-a83a-4c1d-a489-99d58663d28e/sicharge-uc-ipdf-en.pdf>
- [57] Proterra [online]. *Proterra Energy. Fleet Solutions. 75 kW*. ©2020 [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: [https://www.proterra.com/wp-content/uploads/2020/10/SPEC\\_CHG-SYS\\_75\\_V9\\_10.26.20.pdf](https://www.proterra.com/wp-content/uploads/2020/10/SPEC_CHG-SYS_75_V9_10.26.20.pdf)
- [58] Proterra [online]. *Proterra Energy. Fleet Solutions. 150 kW*. ©2020 [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: [https://www.proterra.com/wp-content/uploads/2020/10/SPEC\\_CHG-SYS\\_150\\_V9\\_10.26.20.pdf](https://www.proterra.com/wp-content/uploads/2020/10/SPEC_CHG-SYS_150_V9_10.26.20.pdf)
- [59] Proterra [online]. *Proterra Energy. Fleet Solutions. 250 kW*. ©2020 [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: [https://www.proterra.com/wp-content/uploads/2020/10/SPEC\\_CHG-SYS\\_250\\_V9\\_10.27.20.pdf](https://www.proterra.com/wp-content/uploads/2020/10/SPEC_CHG-SYS_250_V9_10.27.20.pdf)
- [60] Proterra [online]. *Proterra Energy. Fleet Solutions. 500 kW*. ©2020 [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: [https://www.proterra.com/wp-content/uploads/2020/10/SPEC\\_CHG-SYS\\_500\\_V9\\_10.27.20.pdf](https://www.proterra.com/wp-content/uploads/2020/10/SPEC_CHG-SYS_500_V9_10.27.20.pdf)

- [61] Proterra [online]. *Proterra Energy. Fleet Solutions. Dispenser*. ©2020 [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: [https://www.proterra.com/wp-content/uploads/2020/10/SPEC\\_CHG-SYS\\_DISP\\_V8\\_10.26.20.pdf](https://www.proterra.com/wp-content/uploads/2020/10/SPEC_CHG-SYS_DISP_V8_10.26.20.pdf)
- [62] Proterra. *Charging for electric fleets* [online]. ©2021 [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <https://www.proterra.com/energy-services/charging-infrastructure/>
- [63] Proterra [online]. *Proterra Energy. Fleet Solutions. 1,5 MW*. ©2020 [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: [https://www.proterra.com/wp-content/uploads/2020/10/SPEC\\_CHG-SYS\\_1.5M\\_V8\\_10.26.20.pdf](https://www.proterra.com/wp-content/uploads/2020/10/SPEC_CHG-SYS_1.5M_V8_10.26.20.pdf)
- [64] Ekoenergetyka-Polska [online]. *Emobility at its best*. ©2021 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://ekoenergetyka.com.pl/emobility-at-its-best-bus-market/>
- [65] In: *Ekoenergetyka-Polska* [online]. [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://ekoenergetyka.com.pl/charging-stations/mega-charger-1-2/>
- [66] What is OCPP?. CHARGELAB [online]. ©2021 [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: <https://www.chargelab.co/industry-advocacy/ocpp>
- [67] MARTINEZ-LASERNA, E, I GANDIAGA, E SARASKETA-ZABALA, J BADEDA, D.-I STROE, M SWIERCZYNSKI a A GOIKOETXEA. Battery second life: Hype, hope or reality? A critical review of the state of the art. *Renewable & sustainable energy reviews* [online]. Elsevier, 2018, **93**, 701-718 [cit. 2021-05-07]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2018.04.035
- [68] OppCharge: Fast charging of electric vehicles [online]. [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <https://www.oppcharge.org/>
- [69] OPPCHARGE: Common Interface for Automated Charging of Hybrid Electric and Electric Commercial Vehicles. In: *OppCharge.org* [online] 2019 [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.oppcharge.org/dok/OPPCharge%20Specification%202nd%20edition%200190421.pdf>
- [70] EKOVA Electron 12 OppCharge. *Dopravní podnik Ostrava* [online]. ©2019 [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: <https://www.dpo.cz/o-spolecnosti/vozy/autobusy/3794-electron-12-oppcharge.html> [1.4.2021]
- [71] KUCH, Pavel. *RE: Podklady k nabíjecím stanicím* [e-mail]. 4. května 2021 [cit. 2021-05-04].
- [72] Trasa. In: *Mapy.cz* [online]. © Seznam.cz [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?planovani-trasy&x=15.7689053&y=50.0333934&z=14&sid=6097def81cbec09a78ad19af>
- [73] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel*. Vyd. 2. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2006, 432 s. ISBN 80-239-0024-2.

- [74] BALASHOV, Alexandr. Energetická náročnost jízdy elektrobusu. Praha, 2017. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Josef Morkus, CSc.
- [75] DPMP, *Přínosy inteligentních dopravních systémů financovaných z ESIF* [prezentace]. [2021]. Prezentace byla poskytnuta Dopravním podnikem města Pardubic.
- [76] JONES, Jonathan Spencer. Bus-2-grid to launch in London. Clarion Energy. *Smart Energy International* [online]. ©1997-2021 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://www.smart-energy.com/industry-sectors/electric-vehicles/bus-2-grid-to-launch-in-london/>
- [77] Microsoft. *Microsoft Excel* [software]. [přístup 10 dubna 2021]

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

$a$	[m·s <sup>-2</sup> ]	Zrychlení elektrobusu
$A_{celk}$	[J]	Celková práce potřebná pro absolvování celé trasy
$A_{fri}$	[J]	Práce valivého odporu při rozjezdu
$A_{fsi}$	[J]	Práce valivého odporu při jízdě stálou rychlostí
$A_{sbi}$	[J]	Práce odporu stoupání při brzdění
$A_{sri}$	[J]	Práce odporu stoupání při rozjezdu
$A_{ssi}$	[J]	Práce odporu stoupání při jízdě stálou rychlostí
$A_{vri}$	[J]	Práce odporu vzduchu při rozjezdu
$A_{vsi}$	[J]	Práce odporu vzduchu při jízdě stálou rychlostí
$A_{zbi}$	[J]	Práce odporu zrychlení při brzdění
$A_{zri}$	[J]	Práce odporu zrychlení při rozjezdu
$A_{zsi}$	[J]	Práce odporu zrychlení při jízdě stálou rychlostí
$C_x$	[-]	Součinitel vzdušného odporu
$E_{celk}$	[kWh]	Potřebná kapacita bateriového úložiště na jednu jízdu
$E_{max}$	[kWh]	Maximální celková energie baterie
$f$	[-]	Součinitel valivého odporu
$g$	[m·s <sup>-2</sup> ]	Gravitační zrychlení
$G$	[N]	Tíhová síla vozidla
$k_b$	[-]	Bezpečnostní faktor
$k_r$	[-]	Rekuperační faktor
$L_i$	[m]	Vzdálenost mezi počáteční a koncovou zastávkou
$m$	[kg]	Celková hmotnost elektrobusu
$n$	[-]	Maximální počet jízd na jedno nabití baterie
$O_{fi}$	[N]	Valivý odpor
$O_{si}$	[N]	Odpor stoupání
$O_{vi}$	[N]	Odpor vzduchu
$O_{zi}$	[N]	Odpor zrychlení
$P_n$	[kW]	Nabíjecí výkon
$s_{rozi}$	[m]	Délka ujeté dráhy při rozjezdu
$s_{si}$	[m]	Délka ujeté dráhy při stálé rychlosti
$S_x$	[m <sup>2</sup> ]	Čelní plocha elektrobusu
$t_{150}$	[s]	Nabíjecí čas pro výkon 150 kW

$t_{300}$	[s]	Nabíjecí čas pro výkon 300 kW
$t_{450}$	[s]	Nabíjecí čas pro výkon 450 kW
$t_{rozi}$	[s]	Čas pro dosažení maximální rychlosti
$t_{si}$	[s]	Čas jízdy stálou rychlostí
$v_i$	[m·s <sup>-1</sup> ]	Maximální dosažená rychlost v daném úseku
$\alpha_i$	[°]	Úhel sklonu svahu
$\Delta h_i$	[m]	Rozdíl nadmořské výšky počáteční a koncové zastávky
$g$	[-]	Součinitel rotačních částí
$\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	Hustota vzduchu při teplotě 20 °C

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

<i>ABB</i>	Asea Brown Boveri	Švédsko-švýcarská technologická společnost
<i>Bus2Grid</i>	Bus to Grid	Alternativní označení technologie V2G specializované pro elektrické autobusy
<i>BMS</i>	Battery Managment System	Systém správ baterie
<i>BÚ</i>		Bateriové úložiště
<i>BYD</i>	Build Your Dreams	Čínský výrobce elektrických vozidel
<i>CCS</i>	Combined Charging System	Systém kombinovaného nabíjení
<i>DC</i>	Direct Current	Stejnoseměrný proud
<i>DFS</i>	Depot Feeding Station	Depová nabíjecí stanice
<i>DIN</i>	Deutsches Institut für Normung	Označení německých norem
<i>DPMHK</i>		Dopravní podnik města Hradce Králové
<i>EV</i>	Electric Vehicle	Elektrické vozidlo
<i>FCS</i>	Fast Charging Station	Rychlonabíjecí stanice
<i>GPS</i>	Global Positioning System	Globální navigační systém
<i>HE</i>	High Energy	Vysoká energie
<i>HP</i>	High Power	Vysoký výkon
<i>HVC</i>	Heavy Vehicle Charger	Produktová řada NS společnosti ABB
<i>ID</i>	Industrial Design	Industriální verze designu nabíjecí stanice
<i>IEC</i>	International Electrotechnical Commission	Označení mezinárodní normy pro elektrotechniku
<i>IMC</i>	In Motion Charging	Nabíjení během pohybu
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization	Označení mezinárodních norem
<i>JAR</i>		Jihoafrická republika
<i>kWh</i>	Kilowatthodina	Jednotka energie
<i>kWs</i>	kilowattsekunda	Jednotka energie
<i>Li-air</i>	Lithium-air	Lithium-vzduchový (bateriový článek)
<i>LiFePO<sub>4</sub></i>		Lithium-železo-fosfátový (bateriový článek)
<i>Li-ion</i>	Lithium-ion	Lithium-iontový (bateriový článek)
<i>LTO</i>	Lithium Titanate Oxide	Lithium-titanový (bateriový článek)
<i>MHD</i>		Městská hromadná doprava
<i>MS</i>	Microsoft	Americká akciová společnost
<i>MW</i>	Megawatt	Jednotka výkonu



<i>Ni-Cd</i>	Nickel-Cadmium	Nikl-kadmiový (bateriový článek)
<i>Ni-MH</i>	Nickel-Metal Hydride	Nikl-metal hydridový (bateriový článek)
<i>NS</i>		Nabíjecí stanice
<i>OCA</i>	Open Charge Alliance	Společenství výrobců infrastruktury elektrických vozidel
<i>OCPP</i>	Open Charge Point Protokol	Komunikační protokol mezi NS a elektrickým vozidlem
<i>PD</i>	Pantograph Down	Pantograf na NS
<i>PU</i>	Pantograph Up	Pantograf na elektrobusu
<i>QCC</i>	Quick Charging Connector	Způsob připojení k rychlonabíjecí stanici
<i>SAE</i>	Society of Automotive Engineers	Sdružení odborníků z oblasti dopravního průmyslu
<i>STG</i>	Smart Trolley Grid	Chytrá trolejová síť
<i>TFS</i>	Terminus Feeding Station	Nabíjecí stanice na konečné
<i>TOSA</i>	Trolleybus Optimisation Système Alimentation	Projekt zastávkově nabíjených autobusů
<i>UD</i>	Urban Design	Městská verze designu nabíjecí stanice
<i>V2G</i>	Vehicle to Grid	Systém navracení nevyužité energie nazpět do sítě
<i>Wi-Fi</i>	Wireless Fidelity	Technologie přenosu dat bezdrátově
<i>Ws</i>	Wattsekunda	Jednotka energie

## SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1 Elektromotor Štefana A. Jedlíka [3] .....	11
Obr. 2 Elektromote Dr. Ernsta Wernera von Siemens [4] .....	12
Obr. 3 Autobus společnosti London Electrobuses Company [7] .....	12
Obr. 4 Model Škoda 35TR [15] .....	15
Obr. 5 Škoda Perun HP [17] .....	15
Obr. 6 EKOVA Electron [20] .....	16
Obr. 7 Náhled do skříně přibližovače zkratu [24] .....	18
Obr. 8 Průřez trolejového drátu 100 mm <sup>2</sup> [27] .....	19
Obr. 9 Natrolejovací stříšky .....	20
Obr. 10 Diagram úrovně nabití baterie během jízdy [39] .....	23
Obr. 11 Konektor CCS Combo 1 [44] .....	24
Obr. 12 Konektor CCS Combo 2 [44] .....	25
Obr. 13 Rozložení pólů pro J-3105-1 a J-3105-2 [47] .....	26
Obr. 14 Škoda BB29 se zvednutým pantografem [49] .....	26
Obr. 15 Detail uzavřeného spojení kolíku a zásuvky [50] .....	27
Obr. 16 Princip sekvenčního nabíjení tří autobusů [53] .....	29
Obr. 17 Stožár PD (vlevo) a stožár PU (vpravo) [53] .....	29
Obr. 18 EcoFlex modul s dvěma nabíjecími posty [55] .....	30
Obr. 19 Vzduchem chlazené nabíječky, stojanová, na zeď a kapalinou chlazená nabíječka [56] .....	31
Obr. 20 Nabíjecí stříška a dvojice OppCharge stanic, UD a ID [56] .....	31
Obr. 21 Nabíjecí stojan Proterra [61] .....	32
Obr. 22 Nabíjecí systém Proterra 1,5 MW [63] .....	32
Obr. 23 Ekoenergetika Mega Charger [65] .....	33
Obr. 24 Umístění ližin na elektrobuse [69] .....	34
Obr. 25 Pohled shora na vodivé ližiny [69] .....	35
Obr. 26 Výškový profil vybrané linky .....	36
Obr. 27 Zvolená linka č. 8 s vyznačenými zastávkami [72] .....	38
Obr. 28 Rychlostní profil na prvním úseku .....	38
Obr. 29 Vize rozložení jednotlivých trakcí s provozem elektrobuses pro rok 2025 [75] .....	45

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Přehled energetické hustoty různých článků [32][33][34] .....	21
--	----

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1:

Výpočet energetické náročnosti vybrané linky.xslm